

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO E PROJETO DE CONTROLADORES
DE FORÇA PARA ROBÔS MANIPULADORES**

CARLOS ANDRÉ BRENNER DA SILVEIRA

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO E PROJETO DE CONTROLADORES
DE FORÇA PARA ROBÔS MANIPULADORES**

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica

Departamento de Engenharia Mecânica,
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Raul Guenther

FLORIANÓPOLIS
13 DE MARÇO DE 1998

SILVEIRA, Carlos André Brenner da. *Contribuição ao estudo e projeto de controladores de força para robôs manipuladores*. Florianópolis, 1998. 195p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Raul Guenther, DSc.

Defesa: 13/03/98

Apresenta-se a sistemática básica para o projeto de um controlador de força para robôs manipuladores. Realiza-se uma comparação dos principais métodos de controle de força empregados nos robôs manipuladores, discutindo as vantagens e desvantagens de sua utilização. A comparação é feita através de simulações nas quais um manipulador com dois graus de liberdade realiza tarefas em contato com o meio. O modelo dinâmico do manipulador é obtido a partir dos dados do robô PUMA 560. O manipulador é considerado rígido, despreza-se a dinâmica elétrica dos motores e, com o propósito de obter um manipulador com dois graus de liberdade, considera-se que apenas o segundo e terceiro elos tem movimento. O meio possui uma rigidez conhecida e a superfície de contato está livre de atritos.

Palavras-chave: [robôs manipuladores], [controle], [força]

CARLOS ANDRÉ BRENNER DA SILVEIRA

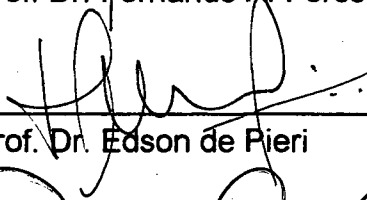
CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO E PROJETO DE CONTROLADORES
DE FORÇA PARA ROBÔS MANIPULADORES

Dissertação julgada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Santa Catarina.

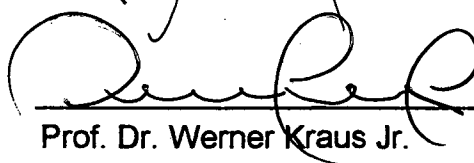
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Fernando A. Forcellini



Prof. Dr. Edson de Pieri



Prof. Dr. Werner Kraus Jr.

Março, 1998

*A Ana Paula, minha companheira de
todas as horas, e a toda minha família, em
especial à meus pais, por me apoiarem em
todos os momentos.*

AGRADECIMENTOS

Ao professor orientador Raul Guenther pela orientação, dedicação, amizade e pela minuciosa correção deste trabalho.

Ao colega Silas do Amaral, pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho, na solução diversos de problemas.

Ao professor Edson de Pierri por ajudar a esclarecer algumas duvidas.

Ao Pedro Luís Andrighetto pela amizade, e ajuda na solução de diversos problemas.

À Cristiane, ao Cleto, ao Nardênio e ao Mauro pela ótima convivência e pelo coleguismo, meu muito obrigado.

Ao Zé, ao Ivan e em especial ao amigo Mauro pela ajuda nos problemas e pelas dicas na operação de softwares e na manutenção de microcomputadores.

A todos os colegas e professores do Departamento de Engenharia Mecânica e do Grante que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao CNPQ pelo suporte financeiro através de bolsa de estudo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMO.....	xvi
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 <i>CONTROLE DE POSIÇÃO (MOVIMENTOS SEM RESTRIÇÃO)</i>	<i>4</i>
1.2 <i>CONTROLE DE FORÇA (MOVIMENTOS COM RESTRIÇÃO).....</i>	<i>6</i>
1.3 <i>PLANEJAMENTO DE TAREFAS</i>	<i>9</i>
1.3.1 <i>Planejamento da Tarefa com Movimento Livre.....</i>	<i>10</i>
1.3.2 <i>Planejamento de Tarefas com Movimentos Restritos.....</i>	<i>11</i>
1.4 <i>SISTEMAS DE COORDENADAS.....</i>	<i>12</i>
1.5 <i>OBJETIVOS DO TRABALHO</i>	<i>14</i>
1.6 <i>ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....</i>	<i>15</i>
2. MODELO DINÂMICO.....	17
2.1 <i>RELAÇÃO CINEMÁTICA ENTRE O SISTEMA DE COORDENADAS DAS JUNTAS E UM SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANO</i>	<i>18</i>
2.2 <i>MODELO DINÂMICO NO SISTEMA DE COORDENADAS DAS JUNTAS</i>	<i>22</i>
2.3 <i>MODELO DINÂMICO EM COORDENADAS CARTESIANAS.....</i>	<i>22</i>
2.4 <i>MODELO DINÂMICO NO ESPAÇO OPERACIONAL</i>	<i>25</i>
2.5 <i>MODELO DINÂMICO NO ESPAÇO DA TAREFA.....</i>	<i>26</i>
2.6 <i>A FORÇA NO EFETUADOR FINAL EM FUNÇÃO DA FORÇA MEDIDA</i>	<i>28</i>

3.MODELO DINÂMICO DO SISTEMA ROBÔ-SENSOR-MEIO	32
3.1 ELO CONSIDERADO COMO UMA MASSA	32
3.2 ELO COM AMORTECIMENTO	35
3.3 ELO EM CONTATO COM O MEIO	36
3.4 MODELO PARA O ELO EM CONTATO COM O MEIO INCLUINDO A DINÂMICA DO SENSOR.....	38
3.5 INFLUÊNCIA DA DINÂMICA DAS TRANSMISSÕES	42
3.6 INFLUÊNCIA DE OUTRAS DINÂMICAS.....	45
3.7 A REDUÇÃO DA DINÂMICA DO SISTEMA.....	47
3.7.1 Meio Considerado como uma Superfície Rígida.....	47
3.7.2 SISTEMA DE QUARTA ORDEM EQUIVALENTE	50
4. MÉTODOS PARA O CONTROLE DE FORÇA E POSIÇÃO	52
4.1 CONTROLE DE RIGIDEZ	53
4.1.1 Controle de Rigidez para Manipuladores com Um Grau de Liberdade....	53
4.1.2 Controle de Rigidez para n Graus de Liberdade.....	56
4.2 CONTROLE DIRETO DE FORÇA.....	61
4.2.1 CONTROLE HÍBRIDO DE FORÇA E POSIÇÃO	61
4.2.1.1 Projeto do Controlador de Posição	65
4.2.1.2 Projeto do Controlador de Força.....	66
4.2.2 Controle no Espaço Operacional	69
4.2.2.1 Generalização das Matrizes de Seleção	69
4.2.2.2 O Controlador no Espaço Operacional.	73
4.2.3. CONTROLE PARALELO	77

4.2.3.1 O controlador Paralelo	78
4.3 O PLANEJAMENTO DA TAREFA E A IMPLEMENTAÇÃO DO	
CONTROLADOR.....	82
4.3.1 Controle de Rigidez.....	82
4.3.2 Controle Híbrido de Força e Posição	84
4.3.3 Controle no Espaço Operacional	85
4.3.4 Controle Paralelo	86
4.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS RELATIVAS AO USO DOS	
CONTROLADORES.....	88
4.4.1. Vantagens no Uso do Controle de Rigidez	88
4.4.2 Desvantagens Relativas ao Uso do Controle de Rigidez.....	88
4.4.3 Vantagens no Uso do Controlador Híbrido	89
4.4.4 Desvantagens no Uso do Controlador Híbrido	89
4.4.5 Vantagens no Uso do Controle Operacional.....	91
4.4.6 Desvantagens no Uso do Controle Operacional.....	91
4.4.7 Vantagens no Uso do Controle Paralelo.....	91
4.4.8 Desvantagens no Uso do Controle Paralelo	92
5. PROJETO DE UM CONTROLADOR DE FORÇA PARA UM MANIPULADOR	
COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE.....	93
5.1 DESCRIÇÃO DAS TAREFAS.....	93
5.2 DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS NOS QUAIS AS TAREFAS	
SERÃO EXECUTADAS	96
5.2.1 Caso 1: Plano Vertical.....	96

5.2.2 Caso 2: Plano Inclinado	96
5.2.3 Caso 3: Superfície Curva	97
5.3 DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO MANIPULADOR UTILIZADO NA REALIZAÇÃO DAS TAREFAS	98
5.4 SENSORES DE FORÇA E POSIÇÃO	100
5.4.1 Sensor de Força	100
5.4.1.1 Força no efetuador final em função da força medida	100
5.4.2 Sensor de Posição	103
5.5 DETERMINAÇÃO DOS SISTEMAS DE COORDENADAS OPERACIONAL, DO SENSOR E DA TAREFA	103
5.5.1 Sistema de Coordenadas Operacional	103
5.5.2 Sistema de Coordenadas do Sensor	104
5.5.3 Sistema de coordenadas da tarefa	104
5.5.3.1 Caso 1: Plano Vertical	104
5.5.3.2 Caso 2: Plano Inclinado	105
5.5.3.3 Meio 3: Superfície Curva	105
5.6 TRANSFORMAÇÕES DE COORDENADAS ENTRE O ESPAÇO OPERACIONAL E O DA TAREFA	106
5.7 DETERMINAÇÃO DOS VALORES DESEJADOS	108
5.7.1 Caso 1: Plano Vertical	110
5.7.2 Caso 2: Plano Inclinado	112
5.7.3 Caso 3: Superfície Curva	113
5.8 DETERMINAÇÃO DOS JACOBIANOS	115

5.8.1 Determinação do Jacobiano Referente ao Espaço Operacional	115
5.8.2 Determinação do Jacobiano Referente ao Espaço da Tarefa	116
5.9 ALGORITIMOS DE CONTROLE DE FORÇA E POSIÇÃO	118
5.9.1 Controle de Rigidez.....	118
5.9.2 Controle de Força e Posição no Espaço Operacional	118
5.9.2.1 Matrizes de Seleção de Força e Posição.....	119
5.9.2.2 Leis de Controle para a Força e a Posição.....	120
5.9.3 Controle Híbrido de Força e Posição	121
5.9.3.1 Matrizes de Seleção.....	122
5.9.3.2 Leis de controle.....	122
5.9.4 Controle Paralelo	123
5.10 DETERMINAÇÃO DOS GANHOS PARA A REALIZAÇÃO DAS TAREFAS	124
6. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	126
6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	126
6.1.1 Controle de Rigidez.....	127
6.1.2 Controle Híbrido de Força e Posição	145
6.1.3 Controle no Espaço Operacional	160
6.1.4 Controle Paralelo	163
6.1.5 Gerais	173
6.2 ANÁLISE DA INCERTEZA DOS PARÂMETROS INERCIAIS DO MANIPULADOR NO DESEMPENHO DO CONTROLADOR.....	179
6.2.1 Resultados Obtidos.....	180
6.2.1.1 Controle de Rigidez.....	180

6.2.1.2 Controle de Híbrido de Força e Posição	180
6.2.1.3 Controle no Espaço Operacional	181
6.2.1.4 Controle Paralelo	181
6.3 ANÁLISE DE UMA MUDANÇA NAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO MEIO NO DESEMPENHO DO CONTROLADOR.....	182
6.3.1 Resultados Obtidos.....	182
6.3.1.1 Controle de Rigidez.....	182
6.3.1.2 Controle de Híbrido de Força e Posição	183
6.3.1.3 Controle Operacional	184
6.3.1.4 Controle Paralelo	184
7. CONCLUSÕES	186
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	191

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - COMPOSIÇÃO USUAL DE UM ROBÔ MANIPULADOR	3
FIGURA 1.2 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLE DE POSIÇÃO EM MALHA FECHADA	5
FIGURA 1.3 - TAREFA COM CONTROLE DE FORÇA.....	6
FIGURA 1.4 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLE DE FORÇA EM MALHA FECHADA	6
FIGURA 1.5 - POSICIONAMENTO DO SENSOR DE FORÇA	7
FIGURA 1.6 - EXTENSÔMETRO DE RESISTÊNCIA SIMPLES.....	8
FIGURA 1.7 - SENSOR DE FORÇA COM EXTENSÔMETRO DE RESISTÊNCIA.....	8
FIGURA 1.8 - ESCRREVENDO NO QUADRO NEGRO.....	10
FIGURA 1.9 - SISTEMAS DE COORDENADAS	13
FIGURA 3.1 - MODELO DE UM ELE CONSIDERADO COMO UMA MASSA	34
FIGURA 3.2 - ELO COM AMORTECIMENTO.....	36
FIGURA 3.3 - SISTEMA DE SEGUNDA ORDEM PARA O MEIO.....	36
FIGURA 3.4 - MODELO PARA O ELO EM CONTATO COM O MEIO.....	37
FIGURA 3.5 - LUGAR DAS RAÍZES PARA O ELO EM CONTATO COM O MEIO	38
FIGURA 3.6 - MODELO PARA O CONJUNTO ELO-SENSOR-MEIO	39
FIGURA 3.7 - MODELO DA FIGURA 3.6 COM A MASSA DO SENSOR E DO ELO JUNTAS	39
FIGURA 3.8 - LUGAR DAS RAÍZES PARA O MODELO (3.18).....	41

FIGURA 3.9 - O ELO (m_2) CONSIDERANDO A DINÂMICA DAS TRANSMISSÕES	42
FIGURA 3.10 - MODELO DA TRANSMISSÃO-ELO-SENSOR-MEIO.....	43
FIGURA 3.11 - LUGAR DAS RAÍZES PARA O SISTEMA (3.23).....	45
FIGURA 3.12 - INCLUINDO OUTRAS DINÂMICAS	46
FIGURA 3.13 - LUGAR DAS RAÍZES PARA O SISTEMA DA FIGURA 3.12.	46
FIGURA 3.14 - MODELO PARA O SISTEMA COM MEIO RÍGIDO	48
FIGURA 3.15 - LUGAR DAS RAÍZES PARA O SISTEMA (3.29).....	49
FIGURA 3.16 - MODELO GERAL DE QUARTA ORDEM PARA O SISTEMA	51
FIGURA 4.1 - SISTEMA COM UM GRAU DE LIBERDADE.....	54
FIGURA 4.2 - ESQUEMA DO FUNCIONAMENTO DO CONTROLE HÍBRIDO	68
FIGURA 4.3 - MOVIMENTO COM UM GRAU DE LIBERDADE.....	70
FIGURA 4.4 - ESQUEMA DO FUNCIONAMENTO DO CONTROLE NO ESPAÇO OPERACIONAL.....	76
FIGURA 4.5 - ESTRUTURA DO CONTROLADOR PARALELO	79
FIGURA 5.1 - GEOMETRIA DO CASO 1, PARA AS TAREFAS T1, T2, T3 E T4	94
FIGURA 5.2 - GEOMETRIA DO CASO 2, PARA AS TAREFAS T1, T2, T3 E T4	94
FIGURA 5.3 - GEOMETRIA DO CASO 3, PARA AS TAREFAS T1, T2, T3 E T4	95
FIGURA 5.4 - PUMA 560	98

FIGURA 5.5 - SISTEMAS DE COORDENADAS OPERACIONAL E DO	
SENSOR	101
FIGURA 5.6 - SISTEMAS DE COORDENADAS DA TAREFA E DO	
SENSOR	102
FIGURA 5.7 - POLINÔMIO DE 5ª ORDEM PARA POSIÇÃO	109
FIGURA 5.8 - POLINÔMIO DE 4ª ORDEM PARA VELOCIDADE.....	109
FIGURA 5.9 - POLINÔMIO DE 3ª ORDEM PARA ACELERAÇÃO	110
FIGURA 6.1 - CONTROLE DE RIGIDEZ, CASO 1, TAREFA 1	128
FIGURA 6.2 - CONTROLE DE RIGIDEZ, CASO 1, TAREFA 2	129
FIGURA 6.3 - CONTROLE DE RIGIDEZ, CASO 1, TAREFA 3	130
FIGURA 6.4 - CONTROLE DE RIGIDEZ, CASO 1, TAREFA 4	131
FIGURA 6.5 - CONTROLE DE RIGIDEZ COM ALGORÍTIMO MODIFICADO,	
CASO 1, TAREFA 4	132
FIGURA 6.6 - CONTROLE DE RIGIDEZ, CASO 2, TAREFA 1	134
FIGURA 6.7 - CONTROLE DE RIGIDEZ, CASO 2, TAREFA 2	135
FIGURA 6.8 - CONTROLE DE RIGIDEZ, CASO 2, TAREFA 3	136
FIGURA 6.9 - CONTROLE DE RIGIDEZ, CASO 2, TAREFA 4	137
FIGURA 6.10 - CONTROLE DE RIGIDEZ COM ALGORÍTIMO MODIFICADO,	
CASO 2, TAREFA 4	138
FIGURA 6.11 - CONTROLE DE RIGIDEZ, CASO 3, TAREFA 1	140
FIGURA 6.12 - CONTROLE DE RIGIDEZ, CASO 3, TAREFA 2	141
FIGURA 6.13 - CONTROLE DE RIGIDEZ, CASO 3, TAREFA 3	142
FIGURA 6.14 - CONTROLE DE RIGIDEZ, CASO 3, TAREFA 4	143

FIGURA 6.15 - CONTROLE DE RIGIDEZ COM ALGORÍTIMO MODIFICADO, CASO 3, TAREFA 4	144
FIGURA 6.16 - CONTROLE HÍBRIDO, CASO 1, TAREFA 1	146
FIGURA 6.17 - CONTROLE HÍBRIDO, CASO 1, TAREFA 2	147
FIGURA 6.18 - CONTROLE HÍBRIDO, CASO 1, TAREFA 3	148
FIGURA 6.19 - CONTROLE HÍBRIDO, CASO 1, TAREFA 4	149
FIGURA 6.20 - CONTROLE HÍBRIDO, CASO 2, TAREFA 1	151
FIGURA 6.21 - CONTROLE HÍBRIDO, CASO 2, TAREFA 2	152
FIGURA 6.22 - CONTROLE HÍBRIDO, CASO 2, TAREFA 3	153
FIGURA 6.23 - CONTROLE HÍBRIDO, CASO 2, TAREFA 4	154
FIGURA 6.24 - CONTROLE HÍBRIDO, CASO 3, TAREFA 1	156
FIGURA 6.25 - CONTROLE HÍBRIDO, CASO 3, TAREFA 2	157
FIGURA 6.26 - CONTROLE HÍBRIDO, CASO 3, TAREFA 3	158
FIGURA 6.27 - CONTROLE HÍBRIDO, CASO 3, TAREFA 4	159
FIGURA 6.28 - CONTROLE OPERACIONAL, CASO 3, TAREFA 3	161
FIGURA 6.29 - CONTROLE OPERACIONAL, CASO 3, TAREFA 4	162
FIGURA 6.30 - CONTROLE PARALELO, CASO 1, TAREFA 1	164
FIGURA 6.31 - CONTROLE PARALELO, CASO 1, TAREFA 2	165
FIGURA 6.32 - CONTROLE PARALELO, CASO 1, TAREFA 3	166
FIGURA 6.33 - CONTROLE PARALELO, CASO 1, TAREFA 4	167
FIGURA 6.34 - CONTROLE PARALELO, CASO 2, TAREFA 1	169
FIGURA 6.35 - CONTROLE PARALELO, CASO 2, TAREFA 2	170
FIGURA 6.36 - CONTROLE PARALELO, CASO 2, TAREFA 3	171

FIGURA 6.37 - CONTROLE PARALELO, CASO 2, TAREFA 4.....	172
FIGURA 6.38 - CONTROLE PARALELO, CASO 3, TAREFA 1.....	174
FIGURA 6.39 - CONTROLE PARALELO, CASO 3, TAREFA 2.....	175
FIGURA 6.40 - CONTROLE PARALELO, CASO 3, TAREFA 3.....	176
FIGURA 6.41 - CONTROLE PARALELO, CASO 3, TAREFA 4.....	177
FIGURA 6.42 - ERROS NO SISTEMA DE COORDENADAS DA TAREFA E NO ESPAÇO OPERACIONAL.....	178

RESUMO

Atualmente a maioria dos robôs industriais são utilizados em tarefas como pintura, manipulação de materiais ou operações de soldagem. Nestas tarefas o efetuador final do manipulador move-se livremente no espaço de trabalho e, por isso, a operação exige somente o controle de posição. Entretanto, em outras tarefas, como montagem ou manipulação de objetos frágeis, o manipulador entra em contato com o espaço de trabalho. Assim sendo, o efetuador final executa um movimento restrito em algumas direções, tornando-se necessário controlar a força de interação entre o manipulador e o espaço de trabalho. Neste trabalho apresenta-se a sistemática básica para o projeto de um controlador de força para robôs manipuladores. Realiza-se uma comparação dos principais métodos de controle de força e posição, diretos ou indiretos, empregados nos robôs manipuladores, destacando-se as vantagens e desvantagens de sua utilização. Esta comparação é feita através de simulações nas quais um manipulador, com dois graus de liberdade, realiza tarefas distintas envolvendo o controle de força e posição em três meios com características geométricas diferentes. O modelo dinâmico do manipulador é obtido a partir de dados do robô PUMA 560. Neste modelo considera-se o manipulador como rígido, despreza-se a dinâmica elétrica dos motores, e com o propósito de obter-se um manipulador com dois graus de liberdade, apenas o 2º e o 3º elo do PUMA 560 possuem movimento, sendo que os demais elos permanecem travados durante a realização das tarefas. As tarefas nas quais o manipulador deve seguir trajetórias de força e posição são realizadas em um plano vertical, em um plano inclinado e em uma superfície curva. Nestes três casos, o meio possui uma rigidez conhecida e a superfície onde ocorre o contato com o manipulador está livre de atritos. Finalmente, com os valores dos ganhos utilizados no manipulador rígido para a descrição das tarefas, simula-se o comportamento do manipulador quando existir um erro na especificação da geometria da tarefa e uma incerteza nos parâmetros inerciais do manipulador.

ABSTRACT

Nowadays, most industrial robots are used in tasks as spray-painting, material manipulation, or weld operations. In these tasks, the manipulator end-effector has a free motion in task space, and then just position control is required. In other tasks, as assembly or fragile objects manipulation, the end-effector interacts with task space. This way, the end-effector perform a constrained motion in some directions, and it is necessary to control the interaction force between the end-effector and the environment. This work presents the basic methodology for the force control design to robotic manipulators. A comparison of the main force and position control methods, direct or indirect, used in robotic manipulators is realized. This comparison is done in simulations where a manipulator with two degree of freedom realizes different tasks for position and force control in three environments with different geometrical forms. The manipulator dynamic model is obtained from PUMA 560 parameters. In this model the manipulator is considered as rigid, the electrical motors dynamics are neglected, and in order to have two degree of freedom only the 2nd and 3rd links can be moved. The tasks where the manipulator must track a position and force trajectory are realized on a vertical plane, horizontal plane and on a curve surface. In these three cases, the environment have a known stiffness and the surface in which the contact occurs is free of friction. Finally, with the same gains values used in the manipulator in the task description, the behavior of the manipulator with geometrical errors and inertial uncertainties is simulated.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A palavra *robô* foi introduzida pelo dramaturgo tcheco *Karel Capek* em sua peça teatral de 1920 intitulada *Rossum's Universal Robots*. A palavra *robota* em tcheco, significa somente trabalho. Apesar de tal significado prático, os escritores de ficção científica tem nos apresentado uma noção romântica de robô.

A palavra *automação*, foi introduzida nos anos 40 na *Ford Motor Company*, como uma contração das palavras *automatic motivation*. O simples termo *automação* trouxe junto duas idéias: a de uma máquina robótica projetada para realizar mecanicamente tarefas especiais, e a de um sistema de controle automático relacionado diretamente a estas máquinas.

O controle automático de sistemas já era feito pelos árabes e gregos na regulação de relógios d'água, para uma informação precisa do tempo. Contudo o controle automático de sistemas só foi impulsionado pela revolução industrial, no século XVIII, com o surgimento de *máquinas sofisticadas o bastante* para requererem controladores.

Em meados de 1948, surgiu o primeiro mecanismo tele-robótico utilizado para manusear material radioativo. O primeiro robô comercialmente disponível foi vendido em 1950. Entretanto, a automação de robôs para uso industrial, nos anos

60, fracassou devido a situação inicial em que se encontrava o conhecimento nesta área

A robótica é um vasto campo interdisciplinar envolvendo diversas disciplinas, tais como, física, estática, dinâmica, teoria de controle, sensores, visão, processamento de sinais, programação de computadores, inteligência artificial e manufatura. Diversos especialistas de diferentes áreas estudam vários aspectos limitados da robótica, entretanto poucos engenheiros são capazes de integrar estas áreas simultaneamente.

Um robô manipulador usualmente é composto de um sistema mecânico e um sistema de controle (Fig. 1). O sistema mecânico é formado por uma série de elos ligados entre si através de juntas. No sistema mecânico destacam-se três elementos principais, o braço, o punho e o efetuador final (Fig. 1). O braço e o punho são responsáveis pelo posicionamento e pela orientação do efetuador final, que é o dispositivo responsável pela realização das tarefas, podendo ser por exemplo, garras, frezas, ventosas, pistolas de pintura, etc.

Para o robô manipulador realizar adequadamente uma tarefa é necessário que este siga corretamente as trajetórias desejadas, definidas para posição e/ou força. Isto é conseguido da seguinte maneira:

Passo 1 - O sistema de controle compara a trajetória desejada de posição e/ou força com a trajetória atual do manipulador, obtida através do uso de diversos sensores tais como de posição, velocidade e força, e gera um sinal de controle para o atuador.

Passo 2 - O atuador, que pode ser um motor elétrico, hidráulico, ou pneumático, movimenta o sistema mecânico ao receber o sinal de controle.

Passo 3 - Retornar ao Passo 1.

Este tipo de malha de controle é conhecida como sistema de malha fechada, que difere do sistema de malha aberta, onde não existem sensores e portanto o sinal de controle é dado unicamente pela trajetória desejada.

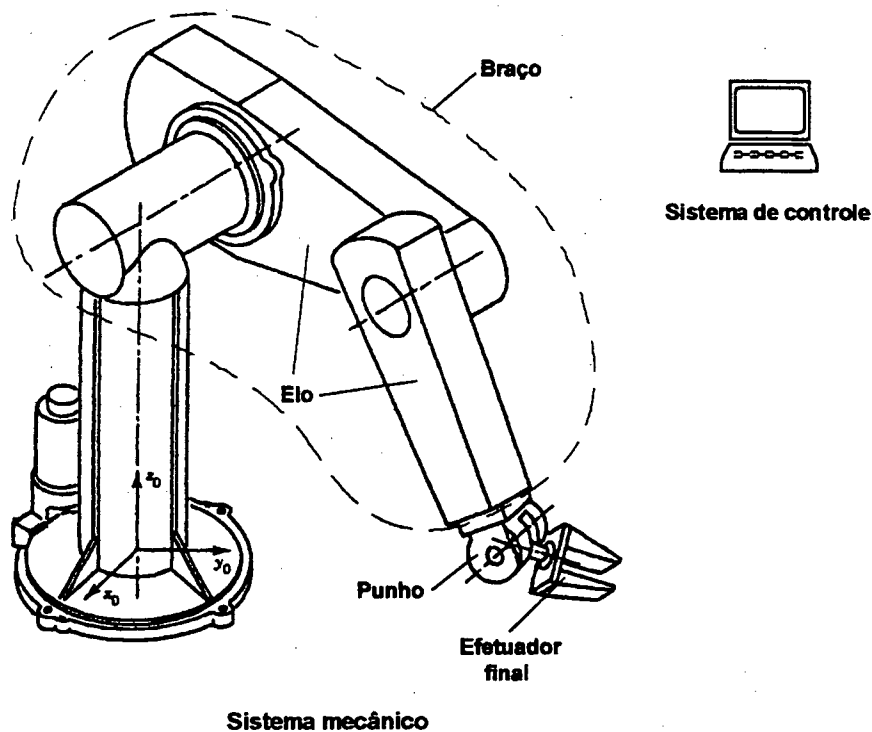


Figura 1.1 - Composição usual de um robô manipulador.

Atualmente a maioria dos robôs industriais possuem somente o controle de posição no qual utilizam as posições das juntas, ou do atuador para fechar a malha de controle. Suas aplicações estão limitadas a operações que utilizam pouca ou nenhuma informação do meio. O controle de posição é adequado para tarefas que não envolvem a interação do manipulador com o meio, tais como pintura, operações de manipulação e solda.

Entretanto, para outras tarefas como montagem, manipulação de objetos frágeis, trabalhos de usinagem ou uma operação executada em conjunto com outro robô, somente o controle de posição pode não ser suficiente. Estes tipos de tarefas, caracterizam-se por colocar o manipulador em contato com o meio, ou seja, existem restrições ao movimento do manipulador em uma ou mais direções. Estas restrições são responsáveis pelo surgimento de forças de contato entre o manipulador e o meio, razão pela qual torna-se necessário o controle de força, afim de evitar danos ao manipulador, ao meio, ou ambos.

Sem um bom sistema de controle, um dispositivo robótico é inviável. O braço do robô e seu controle podem ser descritos como uma única entidade, para a interação com o meio externo.

As capacidades de um robô estão determinadas pela precisão mecânica de seu movimento, pela capacidade de exercer força, pelo número de graus de liberdade do braço, pelo grau de manipulação da garra, sensores, e pela sofisticação e realimentação do controlador.

1.1 CONTROLE DE POSIÇÃO (movimentos sem restrição)

Neste caso deseja-se posicionar o efetuador final do manipulador sem que ele entre em contato com o meio. No planejamento da tarefa, se especificam no espaço de coordenadas da base do manipulador, ao qual chamaremos de espaço operacional, a posição e a orientação (x_d), a velocidade (\dot{x}_d) e a aceleração (\ddot{x}_d) do efetuador final do manipulador. Feito isto, estes valores são transformados, através

do uso da cinemática inversa, em valores de posição (q_d), velocidade (\dot{q}_d) e aceleração (\ddot{q}_d) nas coordenadas de juntas do robô. Então, mede-se através do uso de sensores, a posição (q) e a velocidade (\dot{q}) de cada junta e compara-se com as posições desejadas. Se isto resultar num erro (e), então este erro, através de um controlador, é usado para uma correção no posicionamento das juntas até que o erro seja minimizado ou eliminado. Na Figura 1.2 pode-se observar a representação do controle de posição, em malha fechada, através de um diagrama de blocos.

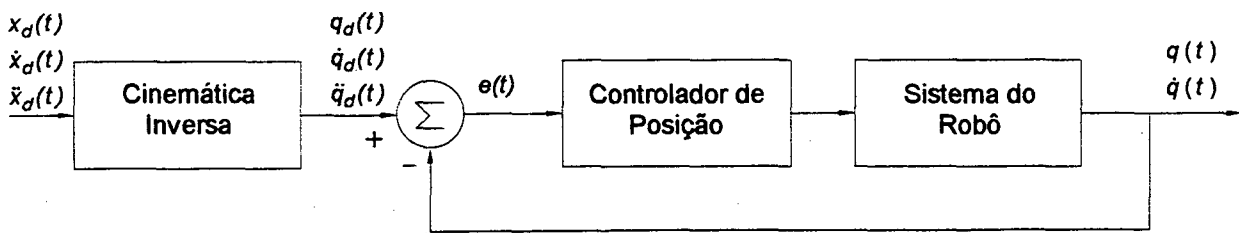


Figura 1.2 - Diagrama de blocos do controle de posição, em malha fechada.

No controle de posição, são utilizados sensores internos, que permitem ao sistema de controle conhecer a posição e a velocidade das juntas do robô. Estes sensores, são basicamente do tipo óptico (encoders) ou magnéticos (resolvers) ou tacômetros. Os sensores ópticos são formados por um disco ranhurado preso ao eixo da junta, e fotocélulas fixas dispostas de tal forma que permitem contar o número de ranhuras e detectar o sentido de giro. Conhecida a quantidade de ranhuras por volta, é possível determinar o ângulo de giro da junta. Os sensores magnéticos dispõem de bobinas, uma móvel com a junta e outra fixa. A posição angular da junta é calculada medindo-se a defasagem produzida na excitação da bobina.

1.2 CONTROLE DE FORÇA (movimentos com restrição)

Um exemplo, mostrado na Figura 1.3, é a tarefa do seguimento de uma "trajetória" da força de contato desejada. Neste caso, o manipulador encontra uma restrição ao seu movimento em $x=x_0$, quando entra em contato com o meio. Para realizar o controle de força indica-se um comando de força de contato desejada $f_d(t)$ para o controlador do braço do robô. A medida do sensor de força do punho, $f_s(t)$, é comparada com a força desejada resultando em um erro de força $e_f(t)$. Este erro é utilizado pelo controlador de força para reposicionar as juntas do manipulador, afim de minimizá-lo ou eliminá-lo. Note que a posição do meio pode ser alterada, e o controlador ainda estará pronto a seguir a trajetória da força desejada. O diagrama de blocos para o controle de força pode ser visto na Figura 1.4.

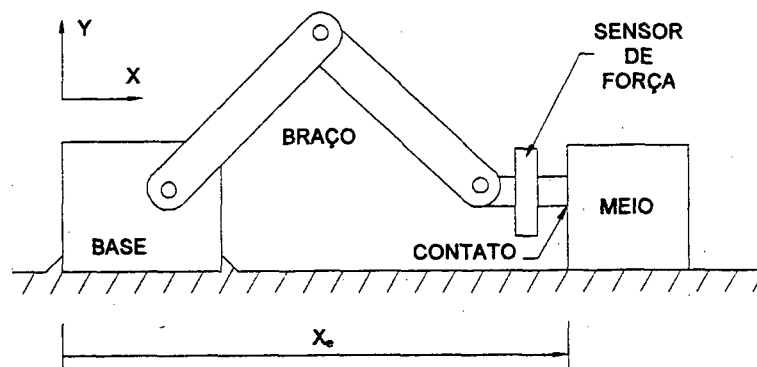


Figura 1.3 - Tarefa com controle de força.

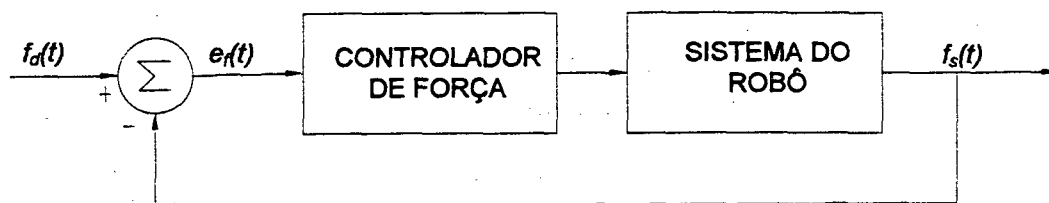


Figura 1.4 - Diagrama de blocos do controle de força.

Os sensores de força situam-se normalmente entre o punho e o efetuador final do manipulador, conforme mostra a Figura 1.5.

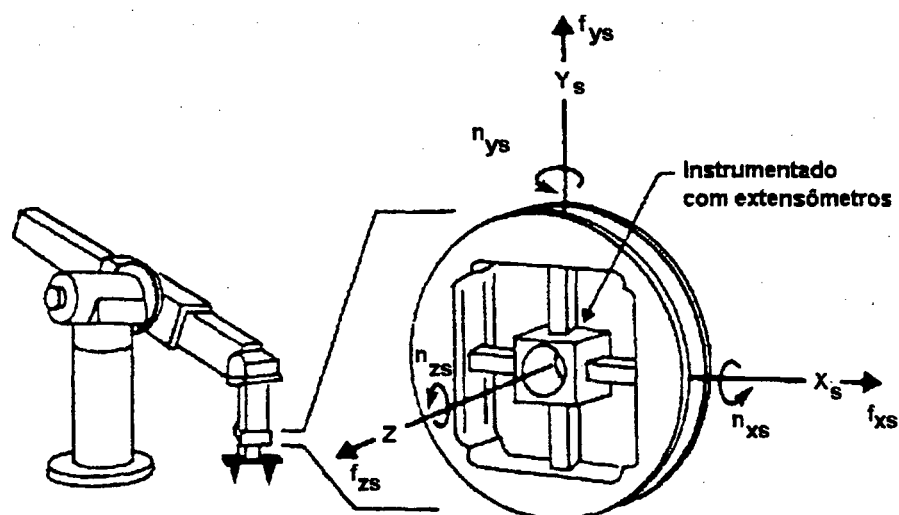


Figura 1.5 - Posicionamento do sensor de força.

Dentre os diversos tipos de sensores de força, destacam-se os sensores que usam extensômetros de resistência de tipo *strain gauge* devido a sua simplicidade e precisão na medição de forças. Seu funcionamento baseia-se no princípio que uma deformação mecânica produz uma mudança na resistência do material condutor, a qual pode ser relacionada com a força aplicada. Para melhor entender o princípio de funcionamento deste dispositivo, considere um simples *strain gauge* composto de um corpo plástico (ou outra base não condutiva, flexível), cuja superfície é coberta com uma fina camada de material condutor (ex. alumínio ou cobre) (Figura 1.6.a).

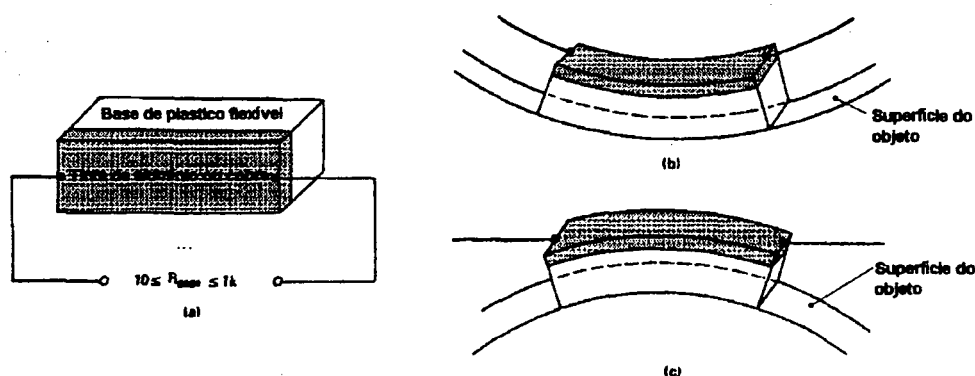


Figura 1.6 - Extensômetro de resistência simples: a) dispositivo sem deformação;
 b) dispositivo defletido de forma a diminuir a resistência do elemento condutor; c) dispositivo defletido de forma a aumentar a resistência do elemento condutor.

Com a deformação, a área da seção transversal do material condutor irá modificar-se, fazendo com que a resistência deste seja modificada, diminuindo ou aumentando (Fig. 1.6.b e 1.6.c, respectivamente).

Na Figura 1.7 pode-se observar um sensor de força que usa este princípio para medir forças e momentos em três direções ortogonais x , y e z . Neste caso são usados 16 extensômetros de resistência.

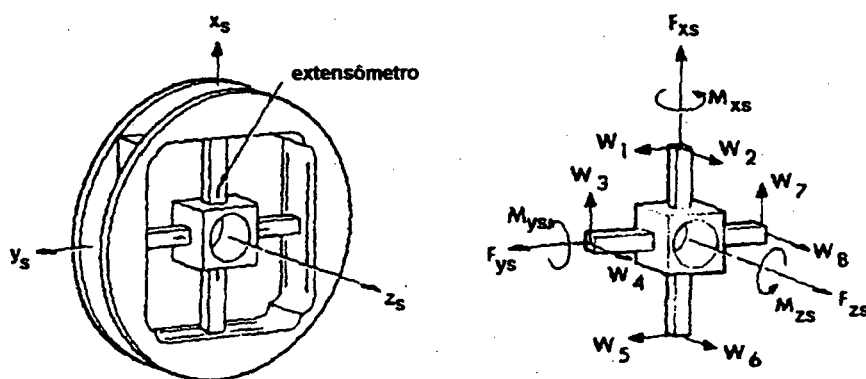


Figura 1.7 - Sensor de força com extensômetros de resistência.

Com os extensômetros medem-se as forças no elemento central w_1 , w_2, \dots, w_8 .

As forças e torques no sistema de coordenadas do sensor $[O, x_s, y_s, z_s]$ podem ser calculados usando a mecânica dos sólidos, e para este dispositivo são dadas por (Klafter, 1989)

$$\begin{array}{l}
 \text{Forças e} \\
 \text{torques} \\
 \text{referenciados} \\
 \text{ao sistema de} \\
 \text{coordenadas} \\
 x_s \ y_s \ z_s
 \end{array}
 \begin{bmatrix} F_{xs} \\ F_{ys} \\ F_{zs} \\ M_{xs} \\ M_{ys} \\ M_{zs} \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 & 0 & k_{13} & 0 & 0 & 0 & k_{17} & 0 \\
 k_{21} & 0 & 0 & 0 & k_{25} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & k_{32} & 0 & k_{34} & 0 & k_{36} & 0 & k_{38} \\
 0 & 0 & 0 & k_{44} & 0 & 0 & 0 & k_{48} \\
 0 & k_{52} & 0 & 0 & 0 & k_{56} & 0 & 0 \\
 k_{61} & 0 & k_{63} & 0 & k_{65} & 0 & k_{67} & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \\ w_6 \\ w_7 \\ w_8 \end{bmatrix}
 \begin{array}{l}
 \text{Forças no} \\
 \text{elemento} \\
 \text{central}
 \end{array}$$

As forças e torques no efetuator final (definidas em algum sistema de coordenadas) são calculadas a partir das forças e torques medidas no sensor.

1.3 PLANEJAMENTO DE TAREFAS

Muitas vezes somente o controle de posição ou de força não satisfazem as exigências da tarefa, tornando-se necessário então o controle simultâneo de força e posição.

Considere por exemplo, o problema de escrita num quadro negro (Figura 1.8). O controle puro de posição não é recomendado, uma vez que um pequeno erro na direção ortogonal ao plano do quadro pode resultar que o giz não toque no

quadro ou quebre. O controle de trajetória faz-se necessário ao longo do plano do quadro, para que o texto seja escrito. É necessário também, fazer um controle da força no plano ortogonal ao quadro para que se possa garantir um contato adequado entre o giz e o quadro.

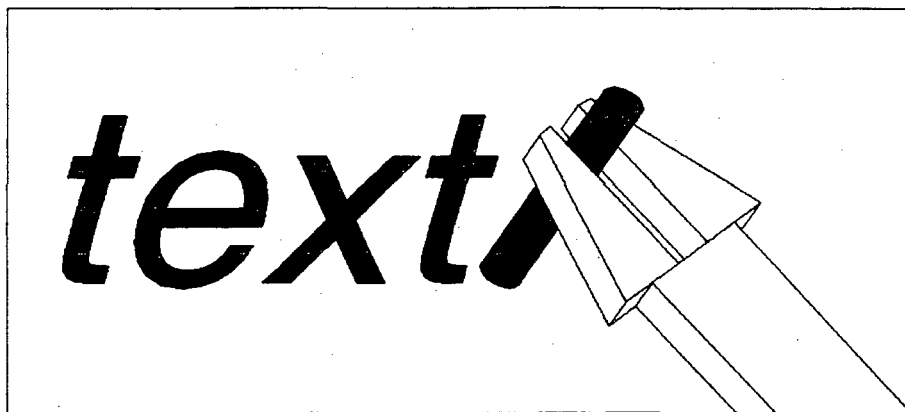


Figura 1.8 - Escrevendo no quadro negro.

Esta divisão nas tarefas de controle de força e posição é necessária pois é impossível controlar simultaneamente força e posição ao longo de um mesmo grau de liberdade, uma vez que a força e a posição estão relacionadas através da Lei de Newton.

1.3.1 Planejamento da Tarefa com Movimento Livre

O planejamento de tarefas com movimento livre consiste na especificação da posição e orientação do efetuador final do manipulador diretamente no espaço operacional. Para que o efetuador final descreva uma trajetória são especificados

pontos pelos quais ele deve passar. Em seguida é feita uma interpolação transformando estes pontos em um polinômio, o qual deve garantir um movimento suave para o manipulador. Os valores especificados no espaço operacional são transformados para o espaço das juntas via cinemática inversa.

1.3.2 Planejamento de Tarefas com Movimentos Restritos

O planejamento de tarefas onde há restrição ao movimento do efetuador final, consiste no posicionamento adequado do sistema de coordenadas e na atribuição de restrições. Estas restrições estão divididas em *restrições naturais* e *restrições artificiais* (Asada e Slotine, 1986; Mason, 1981).

As *restrições naturais* de força e posição surgem naturalmente a partir das características geométricas e mecânicas da configuração da tarefa. As restrições naturais de posição são dadas na direção normal à esta superfície generalizada que define a forma do corpo no qual é realizada a tarefa, enquanto que as restrições naturais de força são dadas nas direções tangentes à esta superfície generalizada. Por exemplo, uma mão em contato com uma superfície rígida e estacionária não está livre para mover-se através desta superfície, então existe uma restrição natural de posição, ortogonal à superfície.

O outro tipo de restrição, chama-se de *restrição artificial* de força e posição. Estas restrições são introduzidas para especificar as posições e forças desejadas. Para serem compatíveis com as restrições naturais, as restrições

artificiais de força são especificadas sobre a normal a superfície generalizada, e as restrições artificiais de posição são especificadas tangentes a esta.

Estes dois tipos de restrições força e posição, dividem os graus de liberdade dos possíveis movimentos do efetuador final, em dois conjuntos ortogonais que necessitam ser controlados de modo diferente. Ou seja, necessita-se de um controlador para força para as direções onde encontra-se as restrições naturais de posição ou restrições artificiais de força e outro para posição nas direções onde existem restrições naturais de força ou restrições artificiais de posição. Note que para restrições de posição estamos nos referindo a restrições de posição e/ou orientação, e para as restrições de força estamos nos referindo a restrições de força e/ou momentos.

1.4 SISTEMAS DE COORDENADAS

A descrição do movimento do efetuador final de um robô manipulador pode ser feita em coordenadas cartesianas, ou então em termos das suas coordenadas de juntas, desde que as correspondentes coordenadas cartesianas sejam calculadas através da cinemática direta.

A descrição em coordenadas cartesianas é a mais usual nos casos em que o efetuador final tem contato com o meio, uma vez que neste caso, as forças de contato ocorrem e são medidas no espaço cartesiano.

Em geral, é mais fácil descrever o movimento do manipulador no sistema de coordenadas do espaço onde a operação esta ocorrendo, denominado **espaço**

operacional. Neste sistema, doravante denominado sistema de coordenadas operacionais e representado por $R_o(O, x, y, z)$, as componentes do vetor $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_m]^T$, relativas a R_o , descrevem completamente a posição e a orientação do efetuador final. Em geral R_o é um sistema de coordenadas fixo na base do manipulador.

Para particionar o espaço de trabalho em direções nas quais o movimento é livre e direções nas quais ele é restrito, é conveniente descrever o movimento do efetuador final em um sistema de coordenadas cartesiano no qual esta partição é facilmente representada. Como esta partição é definida pela tarefa a ser executada, este sistema é denominado **sistema de coordenadas da tarefa**, e é representado por $R_r(O_r, x_r, y_r, z_r)$.

Quando a tarefa exige a aplicação de uma força f_d perpendicular a superfície de um objeto, por exemplo, um sistema de coordenadas conveniente é definido de forma a alinhar o vetor unitário na direção de z_r com a força f_d , veja Figura 1.9. Assim, ao longo da direção z_r controla-se a força e nas demais direções controlam-se as posições.

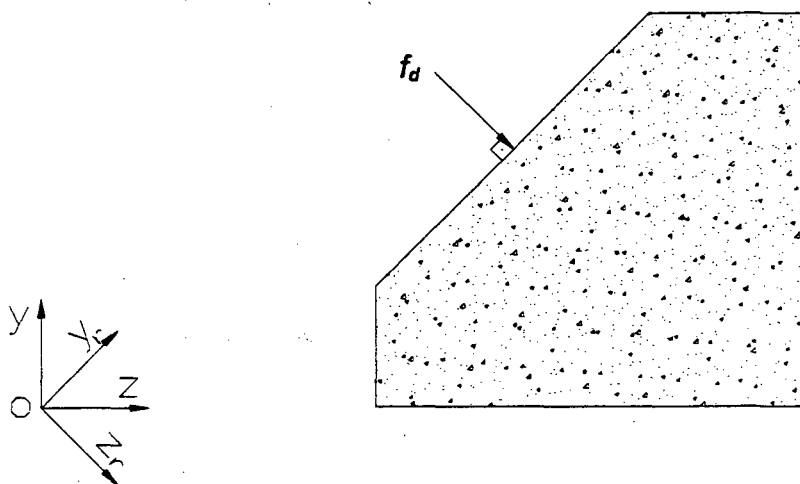


Figura 1.9 - Sistemas de coordenadas.

Se a direção de aplicação da força não é modificada ao longo da tarefa, o sistema de coordenadas da tarefa é fixo. Se, no entanto, a direção da força varia, o sistema de coordenadas da tarefa é móvel, variando de acordo com a direção da força aplicada.

No sistema de coordenadas da tarefa, as componentes do vetor $x_r = [x_{r1} \ x_{r2} \ x_{r3} \ \dots \ x_{rm}]^T$, relativas a R_r , descrevem completamente a posição e a orientação do efetuador final.

Observe que existe diferença entre o sistema de coordenadas operacional e o da tarefa. Veja que o sistema de coordenadas operacional é escolhido de maneira a facilitar a descrição da geometria da tarefa, no espaço cartesiano enquanto que o sistema de coordenadas da tarefa é dado de forma a desacoplar as direções onde é feito o controle de força e de posição.

1.5 OBJETIVOS DO TRABALHO

Tendo como motivação a ampliação da aplicação dos robôs manipuladores, destacamos como objetivos deste trabalho: realizar um estudo comparativo de estratégias de controle de força para robôs manipuladores e estabelecer um procedimento para o projeto de um controlador de força em robôs manipuladores.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para um melhor entendimento de como realizar o projeto de um controlador de força para robôs manipuladores, apresentamos este trabalho, que está dividido da seguinte maneira.

No capítulo 2 se apresenta a relação cinemática entre o sistema de coordenadas de juntas e um sistema de coordenadas cartesiano; o modelo dinâmico do manipulador no sistema de coordenadas de juntas, em coordenadas cartesianas, no espaço operacional e no espaço da tarefa; a força no efetuador final em função da força medida.

No capítulo 3 é apresentado o modelo dinâmico do sistema composto pelo manipulador-sensor-meio. É feito um aumento gradativo do modelo do sistema para obter-se uma representação mais precisa da realidade. É analisado ainda o efeito da flexibilidade e de outros elementos geralmente não modelados na representação matemática do manipulador.

No capítulo 4 são apresentados métodos para o controle de força e posição, tais como, o controle de rigidez, o controle híbrido de força e posição, o controle no espaço operacional e o controle paralelo, destacando suas principais características, vantagens e desvantagens.

No capítulo 5 é feito o projeto de um controlador de força e posição, para os métodos vistos no capítulo 4, empregando-se um manipulador rígido com dois graus de liberdade. O projeto será executado para três superfícies com características geométricas diferentes onde o manipulador desenvolverá quatro tarefas distintas.

No capítulo 6 é apresentado o desempenho dos controladores projetados no capítulo 5 na realização das diversas tarefas. É apresentado ainda, o comportamento destes controladores quando existem erros de estimativa de parâmetros inerciais os das características geométricas do meio.

E finalmente no capítulo 7 apresentaremos nossas conclusões.

CAPÍTULO 2

MODELO DINÂMICO

Nos manipuladores rígidos, o modelo dinâmico do manipulador descreve a relação entre o torque de entrada nas juntas e o movimento de saída no braço do robô. Dois métodos podem ser utilizados na obtenção do modelo dinâmico do manipulador: a formulação por Newton-Euler, que tem como base a aplicação direta da segunda lei de Newton para o movimento, a qual descreve o sistema dinâmico em termos de forças e momentos; e a formulação Lagrangiana, na qual o comportamento do sistema dinâmico é descrito em termos de trabalho e energia, através do uso de coordenadas generalizadas.

Neste trabalho discutem-se, no capítulo 4, algoritmos de controle formulados a partir do modelo dinâmico do manipulador. Esta é a razão pela qual apresentam-se, neste capítulo, os modelos dinâmicos dos manipuladores rígidos no espaço operacional e no espaço da tarefa.

Estes dois modelos são obtidos a partir do modelo dinâmico no sistema de coordenadas das juntas, considerando as relações cinemáticas entre o sistema de coordenadas das juntas e os sistemas cartesianos de coordenadas operacionais e de coordenadas da tarefa.

Neste capítulo apresenta-se ainda, a relação entre as forças medidas no sensor e as forças aplicadas no efetuador final, expressas nos sistemas de coordenadas operacionais e da tarefa.

2.1 RELAÇÃO CINEMÁTICA ENTRE O SISTEMA DE COORDENADAS DAS JUNTAS E UM SISTEMA DE COORDENADAS CARTESIANO

A posição e a orientação do efetuador final de um robô manipulador podem ser definidas por uma transformação homogênea representada por uma matriz 4x4 na forma (Craig, 1986; Asada e Slotine, 1986; Spong e Vidyasagar, 1989)

$$T(q) = \begin{bmatrix} R(q) & p(q) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

onde q é o vetor ($n \times 1$) das variáveis de junta, p é o vetor (3×1) da posição do efetuador em relação à base e $R = [u_n \ u_s \ u_a]$ é a matriz (3×3) de rotação formada pelos vetores unitários u_n , u_s e u_a que definem o sistema de coordenadas do efetuador final em relação a base.

Para especificar uma tarefa é necessário estabelecer a posição e a orientação do efetuador final, que muitas vezes são função do tempo. Isto é fácil para posição.

A descrição da orientação através dos vetores unitários $[u_n \ u_s \ u_a]$ é difícil uma vez que suas nove componentes devem satisfazer a condição de ortonormalidade $R^T R = I$, onde I é a matriz identidade 4×4 .

Este problema é mais crítico quando deseja-se descrever a trajetória (função do tempo) para a orientação. A ortonormalidade precisa ser verificada a cada instante do tempo, não sendo possível realizar qualquer interpolação entre a orientação inicial e a orientação final (De Wit et al., 1992).

O problema de descrever a orientação como uma função do tempo admite, no entanto, uma solução natural quando uma representação mínima é adotada (De Wit et al., 1992). Neste caso não há problema em estabelecer a trajetória do movimento para o conjunto de ângulos escolhidos para representar a orientação.

A posição e a orientação podem ser representadas por

$$x = \begin{bmatrix} p \\ \phi \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

onde p descreve a posição do efetuador final e ϕ é um conjunto de ângulos de Euler ou outra representação de orientação.

Observação 2.1 - Rigorosamente x não é um vetor uma vez que ϕ não é um vetor porque não tem a propriedade comutativa (veja Asada e Slotine, 1986, por exemplo).

Seja $x(t) = [x_1, x_2, \dots, x_p]^T$ um vetor que representa a posição e a orientação do efetuador final em um sistema de coordenadas cartesiano. A transformação de coordenadas não linear entre as variáveis de junta $q(t) \in \mathcal{R}^n$ e as

coordenadas no espaço cartesiano $x(t) \in \mathbb{R}^p$ é dada pela equação da cinemática direta

$$x = h(q). \quad (2.3)$$

A relação entre o vetor de velocidades nas juntas \dot{q} e o vetor de velocidades no efetuador final v é estabelecida pela equação diferencial cinemática

$$v = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ w \end{bmatrix} = J_g(q) \dot{q} \quad (2.4)$$

onde \dot{p} é o vetor (3x1) das velocidades lineares, w é o vetor (3x1) das velocidades angulares e $J_g(q)$ é a matriz Jacobiana.

O cálculo da matriz Jacobiana definida em (2.4), segue usualmente um procedimento geométrico, baseado no cálculo da contribuição da velocidade de cada junta nas velocidades linear e angular do efetuador final (veja Asada e Slotine, 1986, por exemplo). Por isso $J_g(q)$ é chamado de **Jacobiano geométrico** do manipulador.

Se a posição e orientação do efetuador final são especificadas em termos de um número mínimo de parâmetros no espaço operacional como em (2.2), pode-se calcular as velocidades no efetuador final diferenciando a equação da cinemática direta (2.3), ou seja,

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \frac{\partial h(q)}{\partial q} \dot{q} \quad (2.5)$$

onde $\frac{\partial h(q)}{\partial q} = J(q)$ é denominado **Jacobiano analítico**.

As velocidades angulares w podem ser calculadas a partir de $\dot{\phi}$ através de

$$w = Z(\phi)\dot{\phi} \quad (2.6)$$

onde $Z(\phi)$ é uma matriz de transformação que depende das variáveis ϕ escolhidas para representar a orientação do efetuador final. Assim, de (2.4) e (2.6) resulta

$$v = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & Z(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = Z_a(\phi)\dot{x} \quad (2.7)$$

Empregando a relação (2.5) obtém-se

$$v = Z_a(\phi)J(q)\dot{q} \quad (2.8)$$

Com isso a relação entre os Jacobianos resulta

$$J_g(q) = Z_a(\phi)J(q) \quad (2.9)$$

O Jacobiano do manipulador é função da posição do braço, e pode tornar-se singular em alguma posição. Nestes casos, em que sua inversa não existe, o manipulador encontra-se em uma posição singular. Na posição singular, a matriz Jacobiana tem colunas linearmente dependentes, resultando numa redução dos graus de liberdade do efetuador final (Asada e Slotine, 1986).

2.2 MODELO DINÂMICO NO SISTEMA DE COORDENADAS DAS JUNTAS

O modelo dinâmico para um manipulador rígido com n graus de liberdade, em termos das coordenadas de junta pode ser dado por (Craig, 1986; Asada e Slotine, 1986; An, 1988; Spong e Vidyasagar, 1989; Lewis et al., 1993)

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - J_g^T(q)f \quad (2.10)$$

onde τ é o vetor ($n \times 1$) das forças ou momentos nas juntas, $q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$ é o vetor ($n \times 1$) das posições das juntas, $M(q)$ é a matriz ($n \times n$) de inércia do manipulador, $C(q, \dot{q})\dot{q}$ é o vetor ($n \times 1$) que representa as forças e os momentos centrífugos e de Coriolis, $G(q)$ é o vetor ($n \times 1$) representativo das forças e torques gravitacionais, f é o vetor ($n \times 1$) das forças e torques aplicadas no efetuador final definidas no sistema de coordenadas operacional R_o , e $J_g(q)$ é o Jacobiano geométrico do manipulador (De Wit et al, 1992).

O termo $J_g^T(q)f$ representa as forças e momentos nas juntas, originados pelas forças e momentos aplicados no efetuador final, e pode ser obtido usando-se o princípio dos trabalhos virtuais (veja Asada e Slotine, 1986, por exemplo).

2.3 MODELO DINÂMICO EM COORDENADAS CARTESIANAS

O modelo dinâmico em coordenadas cartesianas é obtido considerando a equação cinemática direta $h: q \rightarrow x$ é um mapeamento suave e invertível, entre as

coordenadas de juntas $q \in \mathbb{R}^n$ e as coordenadas cartesianas $x \in \mathbb{R}^m$. Isto requer que $m = n$, ou seja, que o número de graus de liberdade do manipulador seja igual ao número de variáveis no espaço cartesiano (Murray, 1994)

A relação cinemática entre os dois sistemas de coordenadas é dado pelo Jacobiano do mapeamento $h: q \rightarrow x$,

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (2.11)$$

com

$$J(q) = \frac{\partial h}{\partial q} \quad (2.12)$$

Derivando (2.11) em relação ao tempo, obtém-se ainda

$$\ddot{x} = \dot{J}(q)\dot{q} + J\ddot{q} \quad (2.13)$$

Considerando a hipótese que h é suave e invertível, pode-se escrever

$$\dot{q} = J^{-1}\dot{x} \quad \text{e} \quad \ddot{q} = J^{-1}\ddot{x} + \frac{d}{dt}(J^{-1})\dot{x} \quad (2.14)$$

Substituindo as equações (2.14) na dinâmica em termos das coordenadas de juntas (2.10) e pré-multiplicando por $J^{-T} := (J^{-1})^T$, obtém-se

$$\overline{M}(q)\ddot{x} + \overline{C}(q, \dot{q})\dot{x} + \overline{G}(q) = F - f \quad (2.15)$$

onde

$$\bar{M}(q) = J^{-T} M(q) J^{-1}$$

$$\bar{C}(q, \dot{q}) = J^{-T} \left(C(q, \dot{q}) J^{-1} + M(q) \frac{d}{dt} (J^{-1}) \right)$$

$$\bar{G}(q) = J^{-T} G(q)$$

$$F = J^{-T} \tau$$

A equação (2.15) é o modelo dinâmico em termos das coordenadas cartesianas x , com o manipulador em uma configuração q , onde $\bar{M}(q)$ é a matriz de inércia efetiva, $\bar{C}(q, \dot{q})\dot{x}$ é o vetor das forças e torques centrífugos e de Coriolis efetivo e $\bar{G}(q)$ é o vetor de torques gravitacionais efetivo, e F é o vetor das forças e torques nas juntas visto no sistema de coordenadas cartesianas.

Como o mapeamento h é localmente invertível, é possível eliminar q da equação (2.15) utilizando a cinemática inversa

$$q = h^{-1}(x) \quad (2.16)$$

e substituindo (2.14) e (2.16) em (2.15) chega-se a

$$\Lambda(x)\ddot{x} + B(x, \dot{x})\dot{x} + g(x) = F - f \quad (2.17)$$

A equação (2.17) é a equação dinâmica para o conjunto de coordenadas generalizadas x , onde $\Lambda(x)$ é a matriz de inércia, $B(x, \dot{x})\dot{x}$ é o vetor que representa

as forças e momentos centrífugos de Coriolis, $g(x)$ é o vetor das forças e torques gravitacionais.

Na maior parte dos robôs o vetor x não é medido diretamente. Medem-se as variáveis de junta q e calcula-se x a partir da cinemática direta definida pelo mapeamento $h: q \rightarrow x$. Por isto muitas vezes, a dinâmica do manipulador em coordenadas cartesianas é dada pela equação (2.15).

As equações (2.15) e (2.17) possibilitam analisar o comportamento dinâmico do manipulador em coordenadas cartesianas. Para calcular os torques de controle costuma-se usar outra expressão, obtida substituindo a aceleração nas juntas \ddot{q} na equação da dinâmica do manipulador descrita no espaço de juntas (2.10).

Assim, de (2.13) obtém-se

$$\ddot{q} = J^{-1}(q)[\ddot{x} - \dot{J}(q)\dot{q}] \quad (2.18)$$

e substituindo em (2.10) resulta

$$M(q)J^{-1}(q)[\ddot{x} - \dot{J}(q)\dot{q}] + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - J^T(q)f \quad (2.19)$$

2.4 MODELO DINÂMICO NO ESPAÇO OPERACIONAL

Se x é um vetor que representa as coordenadas do efetuador final, no sistema operacional, $h: q \rightarrow x$ é o mapeamento entre as coordenadas nas juntas e

as coordenadas no sistema operacional e, J é o Jacobiano deste mapeamento. Então as equações (2.15) e (2.17) representam o modelo dinâmico do manipulador no espaço operacional, e a equação (2.19) é a equação usada para fins de projeto do controlador.

2.5 MODELO DINÂMICO NO ESPAÇO DA TAREFA

Seja x_r o vetor de coordenadas do efetuador final no sistema de coordenadas da tarefa; seja $h_r: q \rightarrow x_r$ o mapeamento entre as coordenadas nas juntas e as coordenadas no sistema da tarefa; seja J_r o Jacobiano do mapeamento h_r . Então o modelo dinâmico no espaço da tarefa é dado por

$$\bar{M}_r(q)\ddot{x}_r + \bar{C}_r(q, \dot{q})\dot{x}_r + \bar{G}_r(q) = F_r - f_r \quad (2.20)$$

onde

$$\bar{M}_r(q) = J_r^{-T} M(q) J_r^{-1}$$

$$\bar{C}_r(q, \dot{q}) = J_r^{-T} \left(C(q, \dot{q}) J_r^{-1} + M(q) \frac{d}{dt} (J_r^{-1}) \right)$$

$$\bar{G}_r(q) = J_r^{-T} G(q)$$

$$F_r = J_r^{-T} \tau$$

e f_r é o vetor cujas componentes são as forças e torques aplicadas no efetuador final, definidas no sistema de coordenadas da tarefa.

A equação (2.20) é o modelo dinâmico nas coordenadas da tarefa, e descreve o comportamento do efetuador final nas coordenadas x_r , com o manipulador em uma configuração q .

Também neste caso o mapeamento h_r é localmente invertível e

$$q = h_r^{-1}(x_r) \quad (2.21)$$

Da definição do Jacobiano

$$\dot{q} = J_r^{-1} \dot{x}_r \quad (2.22)$$

Substituindo (2.21) e (2.22) em (2.20) obtém-se a equação dinâmica para o conjunto de coordenadas generalizadas x_r

$$\Lambda_r(x_r) \ddot{x}_r + B_r(x_r, \dot{x}_r) + g_r(x_r) = F_r - f_r \quad (2.23)$$

Novamente aqui é usual deixar a dependência de q na equação (2.23).

Para calcular o torque de controle também é usual utilizar uma expressão semelhante a (2.19), ou seja,

$$M(q) J_r^{-1}(q) [\ddot{x}_r - \dot{J}_r(q) \dot{q}] + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = \tau - J_r^T(q) f_r \quad (2.24)$$

2.6 A FORÇA NO EFETUADOR FINAL EM FUNÇÃO DA FORÇA MEDIDA

A força aplicada no efetuador final é $f = [f_{x_1} \ f_{x_2} \ \dots \ f_{x_6}]^T$, onde f_{x_i} é a projeção da força f na direção da coordenada x_i do sistema operacional. O vetor de forças generalizadas f corresponde ao vetor de coordenadas generalizadas $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_6]^T$, que definem a posição e a orientação do efetuador final no sistema operacional.

A força medida no sensor é $f_m = [f_{m_1} \ f_{m_2} \ \dots \ f_{m_6}]^T$, onde f_{m_i} é a projeção de f_m na direção da coordenada x_{s_i} do sistema de coordenadas do sensor. O vetor de forças generalizadas f_m corresponde ao vetor de coordenadas generalizadas $x_s = [x_{s_1} \ x_{s_2} \ \dots \ x_{s_6}]^T$.

As coordenadas generalizadas do sensor podem ser escritas em termos das coordenadas generalizadas do sistema operacional como

$$\begin{aligned} x_{s_1} &= x_{s_1}(x_1, x_2, \dots, x_6) \\ &\vdots \\ x_{s_6} &= x_{s_6}(x_1, x_2, \dots, x_6) \end{aligned} \quad (2.25)$$

Aplicando o princípio dos trabalhos virtuais (veja Asada e Slotine, 1986)

$$f^T \delta x = f_m^T \delta x_s \quad (2.26)$$

onde δx é o vetor de deslocamentos virtuais no sistema operacional e δx_s é o vetor de deslocamentos virtuais no sistema do sensor.

Os deslocamentos virtuais no sistema do sensor podem ser dados por

$$\delta x_s = J_s^o \delta x \quad (2.27)$$

onde J_s^o é o Jacobiano entre o sistema de coordenadas do sensor e o sistema de coordenadas operacional, dado por

$$J_s^o = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{s1}}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial x_{s1}}{\partial x_6} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial x_{s6}}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial x_{s6}}{\partial x_6} \end{bmatrix} = \left[\frac{\partial x_s}{\partial x} \right] \quad (2.28)$$

Substituindo (2.27) em (2.26) obtém-se a relação entre as forças nos dois sistemas de coordenadas

$$f = [J_s^o]^T f_m \quad (2.29)$$

Da mesma maneira pode-se obter a relação entre a força no sensor e no sistema de coordenadas da tarefa.

A força aplicada no efetuador final é $f = [f_{r1} \ f_{r2} \ \dots \ f_{r6}]^T$, onde f_{r_i} é a projeção da força f na direção da coordenada x_{ri} do sistema de coordenadas da tarefa. O vetor de forças generalizadas f corresponde ao vetor de coordenadas

generalizadas $x_r = [x_{r1} \ x_{r2} \ \dots \ x_{r6}]^T$, que definem a posição e a orientação do efetuador final no sistema de coordenadas da tarefa.

As coordenadas generalizadas do sensor podem ser escritas em termos das coordenadas generalizadas do sistema de coordenadas da tarefa como

$$\begin{aligned} x_{s1} &= x_{s1}(x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{r6}) \\ \vdots &\quad \quad \quad \vdots \\ x_{s6} &= x_{s6}(x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{r6}) \end{aligned} \quad (2.30)$$

Aplicando o princípio dos trabalhos virtuais (veja por exemplo, Asada e Slotine, 1986).

$$f^T \delta x_r = f_m^T \delta x_s \quad (2.31)$$

onde δx_r é o vetor de deslocamentos virtuais no sistema de coordenadas da tarefa e δx_s é o vetor de deslocamentos virtuais no sistema do sensor.

Os deslocamentos virtuais no sistema do sensor podem ser dados por

$$\delta x_s = J_s^T \delta x_r \quad (2.32)$$

onde J_s^T é o Jacobiano entre o sistema de coordenadas do sensor e o sistema de coordenadas da tarefa, dado por

$$J_s^r = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{s1}}{\partial x_{r1}} & \cdots & \frac{\partial x_{s1}}{\partial x_{r6}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial x_{s6}}{\partial x_{r1}} & \cdots & \frac{\partial x_{s6}}{\partial x_{r6}} \end{bmatrix} = \left[\frac{\partial x_s}{\partial x_r} \right] \quad (2.33)$$

Substituindo (2.32) em (2.31) obtém-se a relação entre as forças nos dois sistemas de coordenadas

$$f = [J_s^r]^T f_m \quad (2.34)$$

CAPÍTULO 3

MODELO DINÂMICO DO SISTEMA ROBÔ-SENSOR-MEIO

Na realização de tarefas que envolvem o controle de força, o manipulador entra em contato com o meio e a força é medida através de um sensor acoplado próximo ao efetuator final do manipulador.

Feito o contato o conjunto robô-sensor-meio passam a constituir um sistema cuja dinâmica precisa ser considerada no projeto dos controladores de força.

Neste capítulo discute-se o modelo dinâmico para o sistema robô-sensor-meio a partir dos trabalhos de Eppinger e Seering (1987a,1987b,1992), Volpe (1990) com o objetivo de salientar as diferenças existentes entre estes vários modelos, afim de determinar quais os elementos e em que configuração que eles acarretam problemas de estabilidade.

3.1 ELO CONSIDERADO COMO UMA MASSA

A dinâmica do manipulador no espaço operacional, usada para fins de controle é descrita no capítulo anterior, através da equação (2.19)

$$M(q)J^{-1}(q)[\ddot{x} - \dot{J}(q)\dot{q}] + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - J^T(q)f \quad (3.1)$$

onde τ é o vetor ($nx1$) das forças ou momentos nas juntas, $q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$ é o vetor ($nx1$) das posições das juntas, $M(q)$ é a matriz (nxn) de inércia do manipulador, $C(q, \dot{q})\dot{q}$ é o vetor ($nx1$) que representa as forças e os momentos centrífugos, de Coriolis e de atrito, $G(q)$ é o vetor ($nx1$) representativo das forças e torques gravitacionais, f_m é o vetor ($nx1$) das forças e torques aplicadas no efetuador final medidas no sistema de coordenadas operacional R_o , e $J(q)$ é o Jacobiano analítico entre o espaço operacional e o espaço de juntas do manipulador (De Wit et al., 1992)

Esta dinâmica pode ser linearizada e desacoplada utilizando a técnica do torque calculado (veja Asada e Slotine, 1986; Craig, 1986; Spong e Vidyasagar, 1989), em que o torque τ é determinado através de:

$$\tau = \hat{M}(q)\hat{J}^{-1}(q)(a - \dot{\hat{J}}(q)\dot{q}) + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}(q) + \hat{J}^T(q)\hat{f}_m \quad (3.2)$$

onde $\hat{M}(q)$, $\hat{C}(q)$, $\hat{G}(q)$ são os valores estimados para $M(q)$, $C(q)$, $G(q)$, respectivamente, \hat{J} é o valor estimado do Jacobiano, \hat{f}_m é o vetor de forças e torques medido no efetuador final, definido no sistema de coordenadas operacional, e a é um vetor $nx1$ usado para representar as estratégias de controle linear de força e posição, que é definido na sequência.

Na prática, é difícil de se obter $\hat{J}^T(q)\hat{f}_m = J^T(q)f_m$ visto que devido a alta rigidez do sensor e do meio, a medida da força é muito sensível aos deslocamentos do manipulador, tornando-se mais frequente o uso da expressão $\hat{J}^T(q)\hat{f}_d$

De fato, se os valores estimados são iguais aos valores reais ($\hat{M}(q) = M(q)$, $\hat{C}(q) = C(q)$, $\hat{G}(q) = G(q)$, $\hat{J}(q) = J(q)$ e $\hat{f}_m = f_m$), após a substituição da equação (3.2) na equação (3.1) a malha fechada resultante é

$$\ddot{x} = a \quad (3.3)$$

Desta forma, feita a linearização e o desacoplamento, a dinâmica do manipulador pode ser analisada como um conjunto de duplo integradores independentes.

Por isto, para fins de análise, cada elo pode ser representado por uma massa m_i localizada em uma posição x_i , sobre qual atua uma força f_i . Como a análise é igual para todas as massas, não é necessário considerar o índice. Desta forma, na sequência cada elo é representado por uma massa m localizada em uma posição x , sobre a qual atua uma força f (Fig. 3.1)

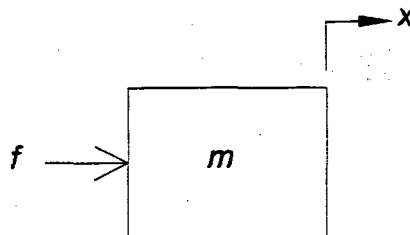


Figura 3.1 - Modelo de um elo considerado como uma massa

Aplicando a lei de Newton, pode-se representar a dinâmica deste sistema pela seguinte equação diferencial

$$m\ddot{x} = f \quad (3.4)$$

Usando a transformada de Laplace, obtém-se a seguinte função de transferência

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2} \quad (3.5)$$

onde s é a variável de Laplace

3.2 ELO COM AMORTECIMENTO

A inclusão do amortecimento devido ao atrito ao modelo da Fig. 3.1, resulta no modelo da Fig. 3.2, cuja equação dinâmica é

$$m\ddot{x} = f - b\dot{x} \quad (3.6)$$

onde b representa o amortecimento presente no elo. A função de transferência neste caso é

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + bs} \quad (3.7)$$

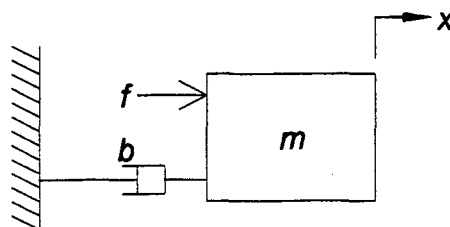


Figura 3.2 - Elo com amortecimento.

3.3 ELO EM CONTATO COM O MEIO

O meio com o qual o manipulador entra em contato pode ser descrito como um sistema de segunda ordem composto de uma massa m_e , de um amortecimento b_e e de uma rigidez k_e (Fig. 3.3).

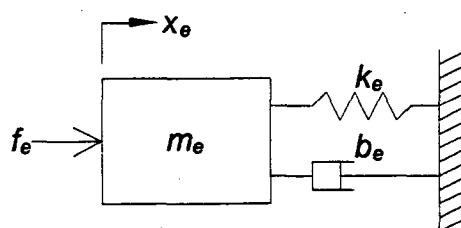


Figura 3.3 - Sistema de segunda ordem para o meio

A força que o manipulador (elo) exerce sobre o meio é f_e , e o deslocamento do meio é x_e .

Quando o manipulador (elo) e o meio estão em contato (Fig. 3.4), pode-se considerar que a posição do meio é a mesma do elo, ou seja, $x_e = x$.

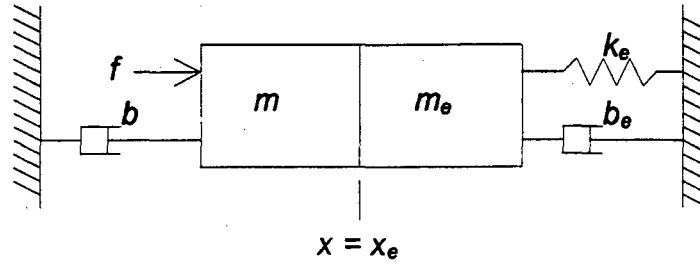


Figura 3.4 - Modelo para o elo em contato com o meio.

Com isso, os modelos dinâmicos, do manipulador e do meio, são descritos como

$$m\ddot{x} = f - f_e - b\dot{x} \quad (3.8)$$

$$m_e\ddot{x} = f_e - b_e\dot{x} - k_e x \quad (3.9)$$

ou, substituindo a força sobre o meio na expressão (3.8),

$$(m + m_e)\ddot{x} + (b + b_e)\dot{x} + k_e x = f \quad (3.10)$$

$$m_e\ddot{x} + b_e\dot{x} + k_e x = f_e \quad (3.11)$$

A equação (3.10) mostra como a força aplicada pelo atuador f leva o elo à posição x , enquanto que a equação (3.11) mostra que com a restrição do movimento do elo resulta em uma força de reação f_e .

A função de transferência para este sistema entre a força aplicada ao elo e a força sobre o meio é

$$\frac{F_e(s)}{F(s)} = \frac{m_e s^2 + b_e s + k_e}{(m + m_e)s^2 + (b + b_e)s + k_e} \quad (3.12)$$

O modelo (3.12) representando o elo em contato com o meio apresenta dois pólos e dois zeros conjugados complexos. É importante notar que os pólos tem uma frequência natural menor do que os zeros e, por isso, a forma do lugar das raízes para este sistema realimentado com um ganho k é mostrada na Fig. 3.5. (veja Franklin et al., 1986). Deste lugar das raízes, conclui-se que o sistema é estável para qualquer ganho k .

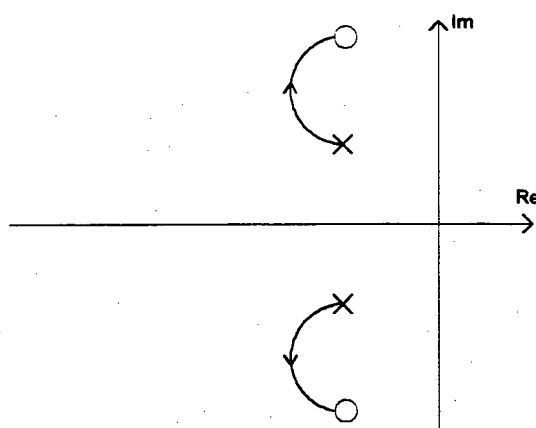


Figura 3.5 - Lugar das raízes para o modelo do elo em contato com o meio.

3.4 MODELO PARA O ELO EM CONTATO COM O MEIO INCLUINDO A DINÂMICA DO SENSOR

A força que o elo aplica no meio é medida por um sensor que possui uma massa m_s , um amortecimento b_s e uma rigidez k_s . Considerando o sensor como um sistema de segunda ordem acoplado ao elo, o modelo dinâmico do conjunto passa a ser o da Fig. 3.6.

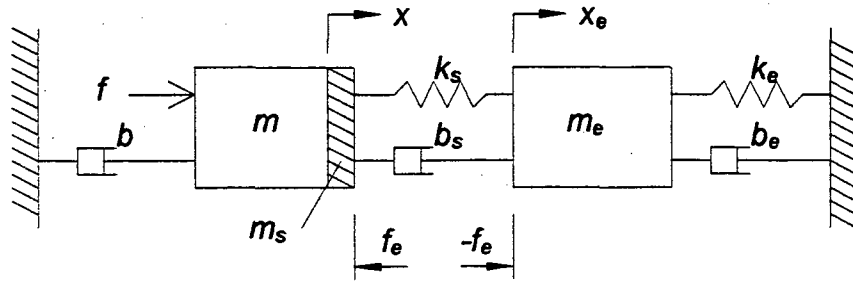


Figura 3.6 - Modelo para o conjunto elo-sensor-meio.

O sensor pode ser considerado acoplado rigidamente ao elo ou ao meio, de acordo com a conveniência. Considerando-o ligado ao elo, sua massa é adicionada a do elo. Por esta razão, daqui em diante considera-se a massa do elo igual a soma das massas do elo e do sensor ($m+m_s \rightarrow m$), Fig. 3.7.

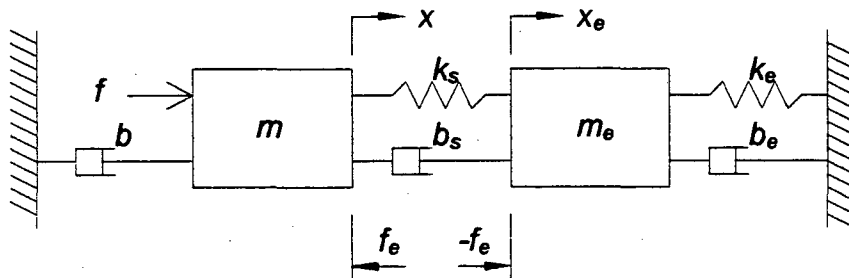


Figura 3.7 - Modelo da Figura 3.6 com a massa do sensor e do elo juntas.

Aplicando a lei de Newton ao conjunto elo/sensor, obtém-se

$$m\ddot{x} + b\dot{x} = f - k_s(x - x_e) - b_s(\dot{x} - \dot{x}_e) \quad (3.13)$$

e para o meio resulta

$$m_e\ddot{x}_e + b_e\dot{x}_e + k_e x_e = k_s(x - x_e) + b_s(\dot{x} - \dot{x}_e) \quad (3.14)$$

Aplicando a transformada de Laplace nestas duas expressões obtém-se

$$X(s) = \frac{1}{ms^2 + (b + b_s)s + k_s} F(s) + \frac{b_s s + k_s}{ms^2 + (b + b_s)s + k_s} X_E(s) \quad (3.15)$$

para o conjunto elo/sensor, e

$$X_E(s) = \frac{b_s s + k_s}{m_e s^2 + (b_s + b_e)s + (k_s + k_e)} X(s) \quad (3.16)$$

para o meio.

Desprezando-se o amortecimento do sensor, a força aplicada no meio é

$$f_e = k_s(x - x_e) \quad (3.17)$$

Utilizando-se (3.15) e (3.16) pode-se obter a função de transferência entre a força f aplicada à massa m e a força aplicada ao meio f_e

$$\frac{F_e(s)}{F(s)} = \frac{(m_e s^2 + b_e s + k_e)k_s}{[ms^2 + bs + k_s][m_e s^2 + b_e s + (k_e + k_s)] - k_s^2} \quad (3.18)$$

Obteve-se assim, um modelo da dinâmica do conjunto elo-sensor-meio, como um sistema de quarta ordem com dois zeros conjugados complexos, cujo amortecimento depende do coeficiente de atrito viscoso do meio b_e .

Segundo Eppinger e Seering (1987a,1987b), o sistema (3.18) realimentado com um ganho k tem o lugar das raízes com a forma indicada na Fig. 3.8.

Comparando o lugar das raízes do modelo (3.18) (Fig. 3.8) com o do modelo (3.9) (Fig. 3.5), verifica-se que o sensor introduz dois pólos conjugados complexos no sistema, cujo amortecimento foi considerado menor que o do meio, no traçado do lugar das raízes. Verifica-se também que os pólos em malha fechada podem ser muito oscilatórios mas permanecem sempre no semi plano da esquerda. Portanto, a malha fechada é sempre estável.

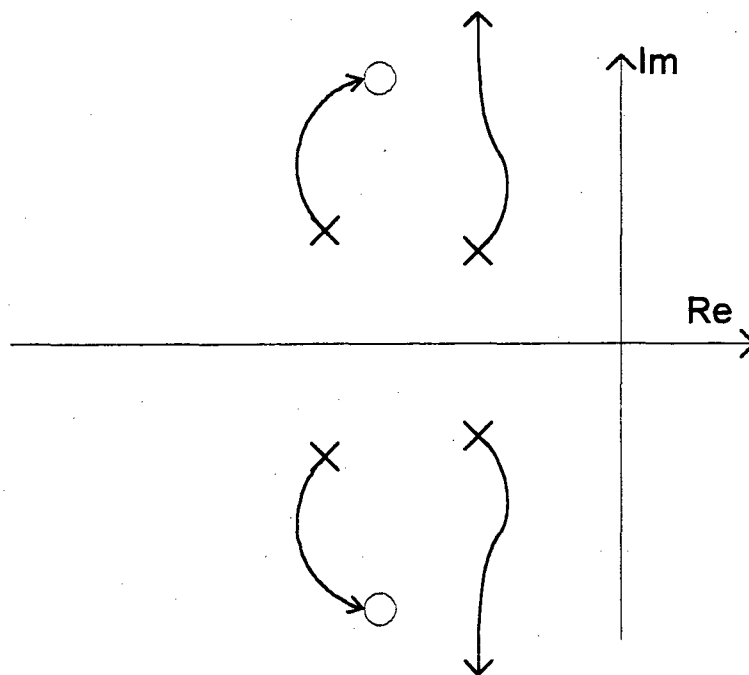


Figura 3.8 - Lugar das raízes para o modelo (3.18).

O modelo (3.18) foi obtido considerando o elo do manipulador como um sistema de segunda ordem com amortecimento (veja equação 3.6)

Isto significa considerar o manipulador rígido, desprezando qualquer outra dinâmica. Diversos autores (Eppinger e Seering, 1987a, 1987b, 1992; Volpe, 1990) analisam a influência da dinâmica das transmissões, da base do manipulador e da garra neste modelo.

3.5 INFLUÊNCIA DA DINÂMICA DAS TRANSMISSÕES

A dinâmica das transmissões de força e torque entre o atuador e o elo do manipulador muitas vezes é considerada incluindo uma massa adicional ao modelo de segunda ordem mostrado na (Fig. 3.2) (Eppinger e Seering, 1987a, 1987b, 1992; Volpe, 1990). Neste caso, a massa total do elo é dividida em duas partes m_1 e m_2 , onde m_1 é vista como a massa do rotor do motor elétrico e m_2 é a massa do elo do manipulador. A constante k_2 representa a rigidez do trem de engrenagens ou a rigidez estrutural da transmissão, e b_2 é o coeficiente de atrito viscoso da transmissão.

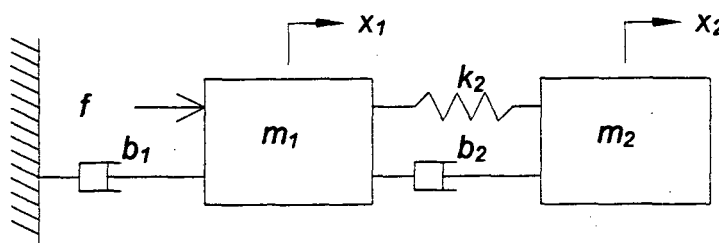


Figura 3.9 - O elo (m_2) considerando a dinâmica das transmissões.

Considerando este modelo em contato com o meio incluindo a dinâmica do sensor, obtém-se o modelo de sexta ordem mostrado na Fig. 3.10.

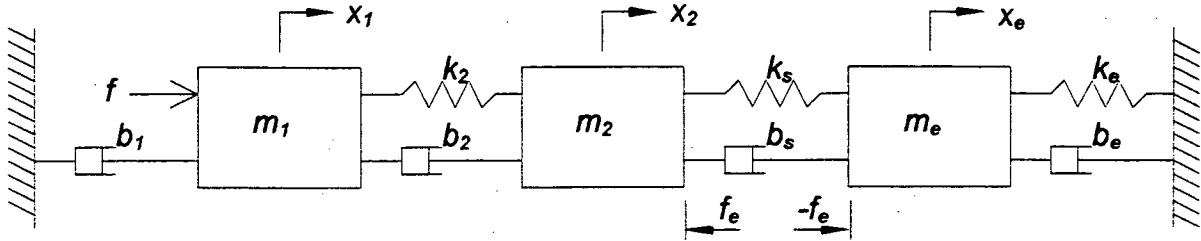


Figura 3.10 - Modelo da transmissão-elo-sensor-meio.

As três variáveis x_1 , x_2 e x_e medem as posições das massas m_1 , m_2 e m_e , respectivamente.

À partir do diagrama de corpo livre de cada uma destas massas mostradas na Fig. 3.10, obtém-se suas respectivas equações do movimento que combinadas resultam nas seguintes funções de transferência:

$$X_1(s) / F(s) = N_4(s) / D_6(s) \quad (3.19)$$

$$X_2(s) / F(s) = N_3(s) / D_6(s) \quad (3.20)$$

$$X_e(s) / F(s) = N_2(s) / D_6(s) \quad (3.21)$$

onde

$$N_4(s) = [m_2 s^2 + (b_2 + b_s)s + (k_2 + k_s)]N_e(s) - (b_s s + k_s)^2$$

$$N_3(s) = N_e(s)(b_2 s + k_2)$$

$$N_2(s) = (b_2s + k_2)(b_s s + k_s)$$

$$D_6(s) = [m_1s^2 + (b_1 + b_2)s + k_2][m_2s^2 + (b_2 + b_s)s + (k_2 + k_s)]N_e(s) + \\ - N_e(s)[b_2s + k_2]^2 - m_1s^2 + (b_1 + b_2)s + k_2][b_s s + k_s]^2$$

$$N_e(s) = m_e s^2 + (b_s + b_e)s + (k_s + k_e)$$

A força medida no sensor é

$$F_m = k_s(x_2 - x_e) \quad (3.22)$$

A função de transferência entre a força aplicada $F(s)$ e a força medida $F_m(s)$, desprezando o amortecimento no sensor como anteriormente, resulta

$$\frac{F_m(s)}{F(s)} = \frac{(m_e s^2 + b_e s + k_e)(b_2 s + k_2)}{D_6(s)} \quad (3.23)$$

Comparando (3.18) com (3.23) conclui-se que a dinâmica das transmissões implica na introdução de dois pólos e um zero real estável.

Segundo Eppinger e Seering (1987a, 1987b), o sistema (3.23) realimentado com um ganho k tem um lugar das raízes com a forma indicada na Fig. 3.11.

Da Fig. 3.11 verifica-se que este sistema só é estável para pequenos ganhos.

Desta forma, a inclusão da dinâmica das transmissões altera o comportamento dinâmico da malha fechada de forma substantiva, introduzindo a possibilidade do sistema ser instável.

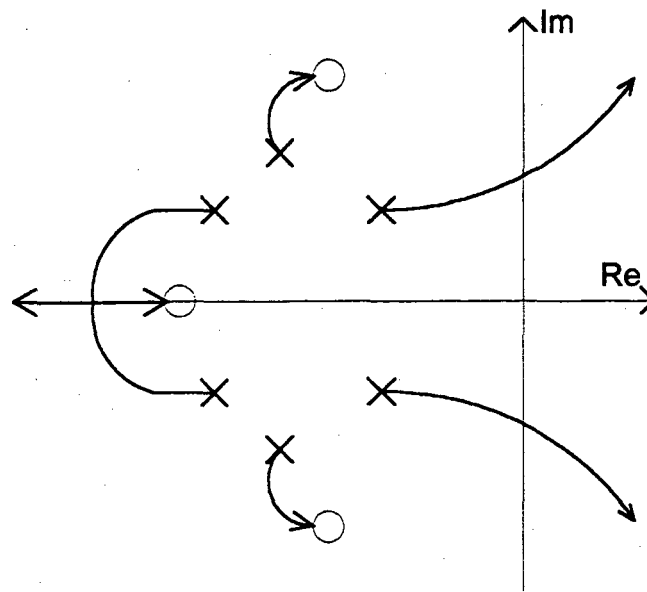


Figura 3.11 - Lugar das raízes para o sistema (3.23).

Isto ocorre devido ao fato do sistema passar a ser “não-colocado”, ou seja, o fato do atuador e do sensor estarem em pontos distintos do sistema (o atuador está na massa m_1 mostrado na Fig. 3.10, e o sensor está na massa m_2) (Eppinger e Seering, 1987a, 1987b, 1992)

3.6 INFLUÊNCIA DE OUTRAS DINÂMICAS

Em Eppinger e Seering (1987b) analisa-se também a influência da dinâmica da base do manipulador e da garra do efetuator final. Para tanto propõe-se o modelo mostrado na Fig. 3.12, cujo lugar das raízes para uma realimentação proporcional tem a forma mostrada na Fig. 3.13.

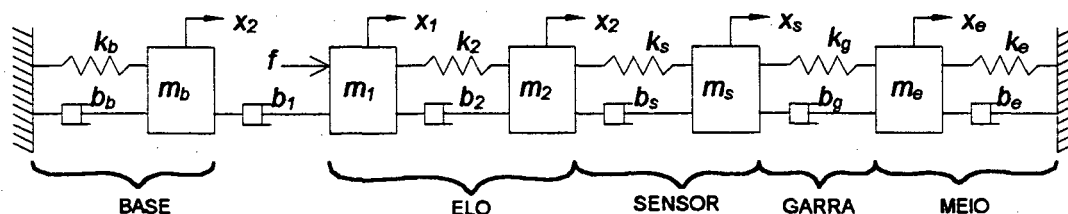


Figura 3.12 - Incluindo outras dinâmicas

O lugar das raízes mostrado na Fig. 3.13 indica que os novos efeitos modificam a dinâmica do sistema mas que somente um modo se torna instável com o aumento do ganho.

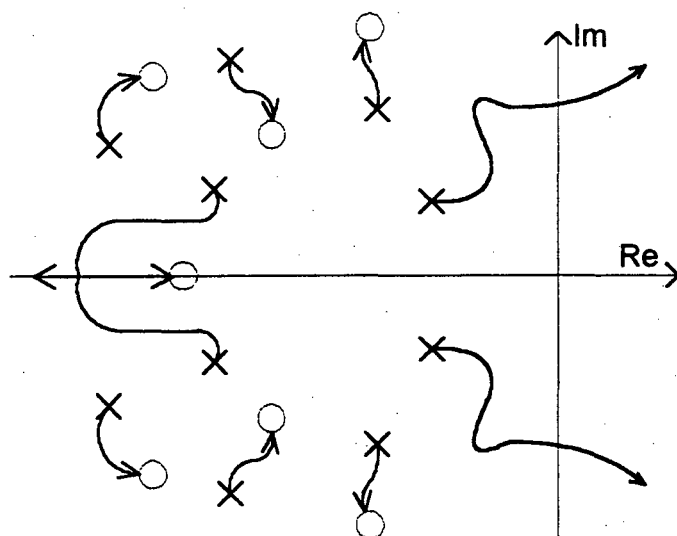


Figura 3.13 - Lugar das raízes para o sistema da Figura 3.12.

As dinâmicas à esquerda da transmissão e a direita do sensor adicionam o mesmo número de pólos e zeros, enquanto que a dinâmica da transmissão do elo adiciona mais pólos que zeros.

Desta forma Eppinger e Seering (1987b) mostram que o mais importante é considerar a dinâmica das transmissões, e que o modelo de sexta ordem mostrado

na Fig. 3.10 retêm os aspectos principais a serem levados em conta no projeto do controlador de força.

3.7 A Redução da Dinâmica do Sistema

O modelo dinâmico de sexta ordem mostrado na Fig. 3.10 é relativamente complexo. Por isso, muitas vezes a análise dos controladores de força para manipuladores é feita com base em modelos de ordem reduzida.

A redução da ordem é usualmente conseguida considerando-se o meio como uma superfície rígida, ou obtendo um sistema de quarta ordem equivalente (Volpe, 1990).

3.7.1 Meio Considerado como uma Superfície Rígida

Se todas as dinâmicas exceto as relativas ao braço forem removidas e o meio for representado como uma superfície rígida, sem dinâmica, obtém-se o modelo mostrado na Fig. 3.14. O modelo do robô ainda inclui a dinâmica do corpo rígido e do modo vibratório.

Neste modelo x_1 e x_2 , medem os deslocamentos das massas m_1 do rotor e m_2 do elo do robô.

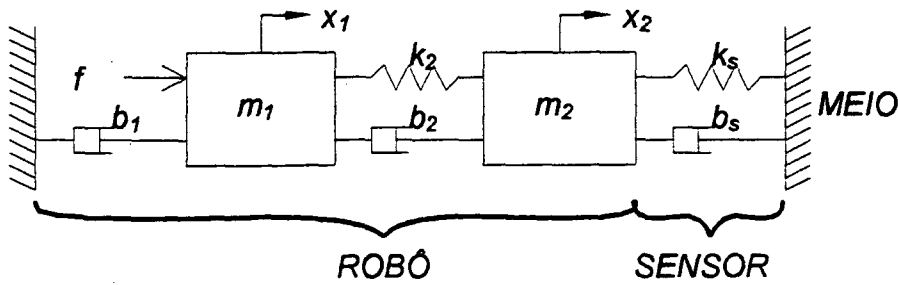


Figura 3.14 - Modelo para o sistema com o meio rígido

Aplicando a Lei de Newton as malhas m_1 e m_2 obtém-se

$$m_1 \ddot{x}_1 = f - b_1 \dot{x}_1 - k_2(x_1 - x_2) - b_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (3.24)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = k_2(x_1 - x_2) + b_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_s x_2 - b_s \dot{x}_2 \quad (3.25)$$

Efetuada a transformada de Laplace resulta

$$X_1(s) = \frac{1}{m_1 s^2 + (b_1 + b_2)s + k_2} F(s) + \frac{b_2 s + k_2}{m_1 s^2 + (b_1 + b_2)s + k_2} X_2(s) \quad (3.26)$$

$$X_2(s) = \frac{b_2 s + k_2}{m_2 s^2 + (b_2 + b_s)s + (k_2 + k_s)} X_1(s) \quad (3.27)$$

Combinando estas equações e lembrando que a força medida no sensor é

$$F_m = k_s x_2 \quad (3.28)$$

pode-se obter a função de transferência entre a força aplicada e a força medida

$$\frac{F_m(s)}{F(s)} = k_s \frac{b_2 s + k_2}{[m_1 s^2 + (b_1 + b_2)s + k_2][m_2 s^2 + (b_s + b_2)s + k_s + k_2] - (b_2 s + k_2)^2} \quad (3.29)$$

A equação (3.29) descreve a dinâmica do modelo do manipulador com transmissões flexíveis em contato com um meio rígido. Trata-se de um sistema de quarta ordem com um zero real. Segundo Eppinger e Seering (1987a, 1987b) o sistema (3.29) realimentado com um ganho k tem o lugar das raízes com a forma indicada na Fig. 3.15.

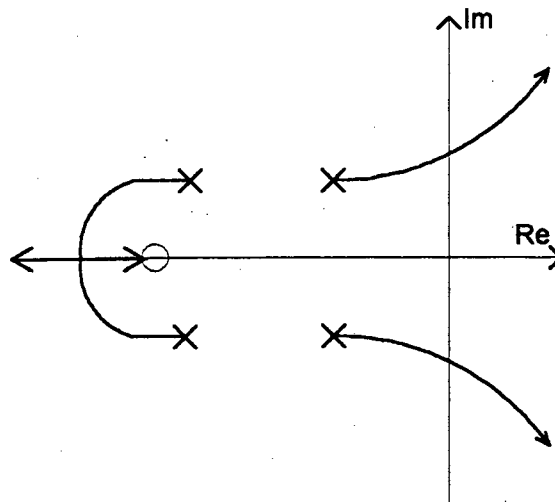


Figura 3.15 - Lugar das raízes para o sistema (3.29).

A comparação do lugar das raízes do manipulador com transmissão flexível atuando em um meio rígido (Fig. 3.15), com o lugar das raízes do manipulador rígido atuando em um meio flexível (Fig. 3.8), mostra a diferença fundamental entre os dois casos.

Enquanto a dinâmica do manipulador rígido atuando em um meio flexível é sempre estável, a dinâmica do manipulador flexível atuando em um meio rígido só é estável para pequenos ganhos de realimentação.

A dinâmica do manipulador rígido atuando em um meio flexível sempre é estável porque neste caso o sensor e o atuador estão localizados na massa que representa o elo rígido (m), e o sistema é dito “colocado”.

A pequena margem de estabilidade observada na dinâmica do manipulador flexível atuando em um meio rígido é devida ao fato do sensor estar localizado na massa que representa o elo (m_2) e o atuador estar na massa que representa o rotor (m_1). Este sistema é chamado “não colocado”.

3.7.2 Sistema de Quarta Ordem Equivalente

Quando a dinâmica do meio não pode ser desprezada, a redução do modelo de sexta ordem para um modelo de quarta ordem equivalente, pode ser feita tratando-se o sistema como se este fosse composto de apenas duas massas. Esta nova configuração é obtida com base no fato do sensor e do manipulador estarem ligados mecanicamente, podendo ser tratados como um único sistema de segunda ordem. Este novo modelo é apresentado na Fig. 3.16 e possui a seguinte função de transferência

$$\frac{F_m(s)}{F(s)} = \frac{k_2(m_B s^2 + b_3 s + k_3)}{(m_B s^2 + (b_2 + b_3)s + k_2 + k_3)(m_A s^2 + b_1 s) + (m_B s^2 + b_3 s + k_3)(b_2 s + k_2)} \quad (3.30)$$

onde, k_3 e b_3 representam a rigidez e o amortecimento do meio, k_1 e b_1 representam a rigidez e o amortecimento do braço, m_A representa a massa do atuador do braço e do sensor, m_B representa o valor da massa do meio, sensor e braço. A rigidez e o amortecimento k_2 e b_2 são determinados a partir da associação dos elementos. Um método estimar-se os valores de m_A , m_B , k_2 e b_2 pode ser obtido em Volpe (1990)

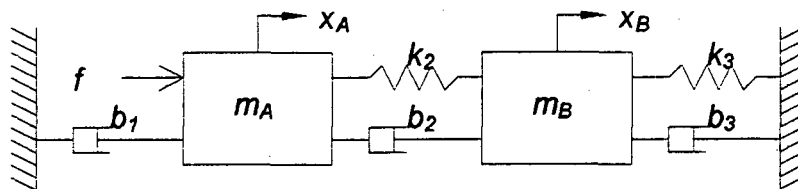


Figura 3.16 - Modelo geral de quarta ordem para o sistema

No modelo (3.30) proposto por Volpe (1990), o sensor é considerado localizado na massa do rotor (m_A), a mesma onde atua o sinal de controle. O sistema dinâmico é, por conseguinte, colocado. A estabilidade não depende do ganho de realimentação como indica o lugar das raízes da Fig. 3.8.

CAPÍTULO 4

MÉTODOS PARA O CONTROLE DE FORÇA E POSIÇÃO

Devido a grande variedade de tarefas onde é necessário o controle de força e posição, cada qual com diferentes características, e pelo fato de que as dinâmicas envolvidas na interação do manipulador com o meio são bastante variadas, surgiram diversas técnicas de controle do manipulador. Estas técnicas estão divididas em dois grupos: o controle indireto de força, onde a força aplicada é calculada a partir da posição do manipulador e o controle direto de força, onde a força, medida através do uso de sensores de força, é usada diretamente pelo controlador afim de minimizar ou eliminar o erro de força. Examinam-se neste capítulo algumas técnicas de controle direto de força referenciadas como controle híbrido (Raibert et al., 1981 e Chae et al., 1988), o controle no espaço operacional (Khatib, 1987) e o controle paralelo (Chiaverini e Sciavicco, 1993).

Para fins de comparação apresenta-se também um método em que a força é controlada indiretamente conhecido como controle de rigidez (Salisbury e Craig, 1980).

4.1 CONTROLE DE RIGIDEZ

O controle de rigidez é um método através do qual a força é controlada indiretamente. No controle indireto de força não existe a leitura direta da força de contato entre manipulador e o meio. O valor da força que o manipulador está realmente exercendo no meio não é conhecido, sendo sua grandeza estimada através do conhecimento da posição do efetuador final do manipulador, da posição do meio e da rigidez do meio.

A seguir é feita uma descrição do controlador de rigidez para manipuladores com um grau de liberdade e com n graus de liberdade.

4.1.1 Controle de Rigidez para Manipuladores com Um Grau de Liberdade

Considere a Figura 4.1, onde um elo rígido, representado por uma massa m , entra em contato com um meio estático modelado como uma mola de rigidez k_e , localizado numa posição x_e . Ao posicionar o elo em $x > x_e$, a força exercida sobre o meio f_e , é dada por

$$f_e = k_e(x - x_e) \quad (4.1)$$

O controle de posição deste sistema consiste em estabelecer uma entrada de força f tal que a massa mova-se para uma posição desejada x_d .

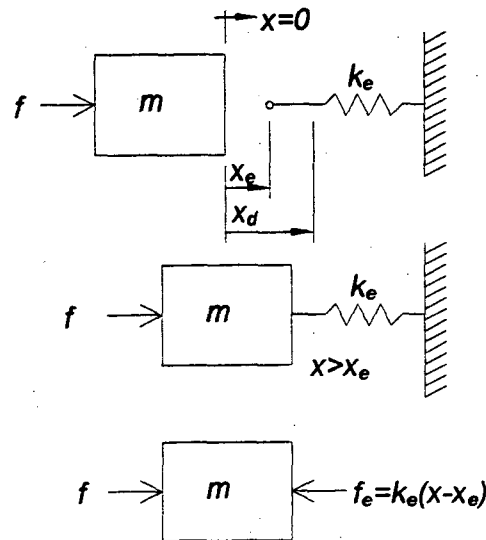


Figura 4.1 - Sistema com um grau de liberdade

Utilizando a lei de Newton obtém-se a equação dinâmica

$$m\ddot{x} + k_e x = f + k_e x_e \quad (4.2)$$

O controle de posição para este sistema dinâmico pode ser feito utilizando um controlador tipo PD em que a força (sinal de controle) é dada por

$$f = -k_v \dot{x} + k_p(x_d - x) \quad (4.3)$$

onde $k_v > 0$ é o ganho derivativo e $k_p > 0$ é o ganho proporcional. A malha fechada resultante é obtida substituindo a equação (4.3) em (4.2),

$$m\ddot{x} + k_v \dot{x} + (k_p + k_e)x = k_p x_d + k_e x_e \quad (4.4)$$

Considerando que $k_e > 0$, $k_p > 0$ e $k_v > 0$, o critério de Routh permite afirmar que o sistema é estável. Na condição de equilíbrio ($\dot{x} = \ddot{x} = 0$), a posição de regime permanente é

$$\bar{x} = \frac{k_p x_d + k_e x_e}{k_p + k_e} \quad (4.5)$$

Usando o resultado (4.5) na equação (4.1) obtém-se a força aplicada no meio em regime permanente

$$\bar{f}_e = \frac{k_p k_e (x_d - x_e)}{k_p + k_e} \quad (4.6)$$

Para meios muito rígidos ($k_e \gg k_p$), esta força é aproximadamente

$$\bar{f}_e \cong k_p (x_d - x_e) \quad (4.7)$$

Note que a força aplicada no meio deve-se ao fato do controlador, ao tentar eliminar o erro de posição ($x_d - x$), levar o elo (massa m) a uma posição que está ligeiramente dentro do meio.

Observe também, na equação (4.7), que a força exercida no meio é obtida através da constante k_p . Esta constante do controlador corresponde a uma mola cuja rigidez pode ser ajustada. Daí o nome de **controle de rigidez**.

Portanto, a força sobre o meio é obtida ajustando a rigidez do controlador k_p , planejando a posição desejada x_d , e posicionando o meio em x_e .

Se a massa m é comandada para uma posição x_d no espaço livre (onde $k_e = 0$), pela equação (4.5) observa-se que o sistema converge para a posição desejada. Entretanto, no caso de haver uma restrição ao posicionamento do manipulador ($k_e > 0$), o sistema não irá para a posição desejada mas sim para uma posição intermediária \bar{x} .

4.1.2 Controle de Rigidez para n Graus de Liberdade

O controle de rigidez para n graus de liberdade é obtido da mesma forma que o controle de rigidez para um grau de liberdade.

Seja o vetor força exercida no meio $f_e = [f_{ex} \ f_{ey} \ f_{ez} \ M_{ex} \ M_{ey} \ M_{ez}]^T$,

onde f_{ex} , f_{ey} e f_{ez} são as componentes da força nas direções x , y e z do sistema de coordenadas operacional, respectivamente, e M_{ex} , M_{ey} e M_{ez} são as componentes do momento nas direções x , y e z , respectivamente.

Neste caso a força exercida no meio é definida como

$$f_e = K_e(x - x_e) \quad (4.8)$$

onde K_e é uma matriz diagonal $n \times n$, constante e positiva semi definida, usada para descrever a rigidez do meio, x_e é um vetor $n \times 1$ medido no sistema de coordenadas operacionais do manipulador e usado para informar a posição e a orientação

estática do meio e x é um vetor $nx1$ que descreve a posição e a orientação do efetuador final do manipulador.

A dinâmica do manipulador no espaço das juntas é representada pela equação (2.10),

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - J^T(q)f$$

Utilizando um controlador proporcional-derivativo no espaço operacional com compensação dos torques gravitacionais (PD+G), a lei de controle é dada por

$$\tau = J^T(q) \left[-K_v \dot{x} + K_p \tilde{x} \right] + \hat{G}(q) \quad (4.9)$$

onde K_v e K_p são matrizes nxn diagonais, constantes, positivas definidas, representando respectivamente os ganhos derivativo e proporcional. O erro entre a trajetória desejada (x_d , vetor $nx1$) para o manipulador e a real (x , vetor $nx1$) é dado pelo vetor $nx1$, $\tilde{x} = x_d - x$. O vetor $nx1$ $\hat{G}(q)$ representa a estimativa dos torques gravitacionais. A matriz $J(q)$ é o Jacobiano analítico entre o espaço operacional e o espaço de juntas do manipulador.

Substituindo as equações (4.8) e (4.9) em (2.10) e assumindo que os torques gravitacionais estão perfeitamente compensados ($\hat{G}(q) = G(q)$), chega-se a seguinte equação em malha fechada

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = J^T(q) (-K_v \dot{x} + K_p \tilde{x} - K_e (x - x_e)) \quad (4.10)$$

A estabilidade do sistema (4.10) pode ser analisada utilizando-se a seguinte função de Lyapunov (Slotine, 1986)

$$V = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + \frac{1}{2} \tilde{x}^T K_p \tilde{x} + \frac{1}{2} (x - x_e)^T K_e (x - x_e) \quad (4.11)$$

Derivando a equação (4.11) com respeito ao tempo e utilizando a relação cinemática (2.11) chega-se a

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} + \dot{q}^T M(q) \ddot{q} - \dot{q}^T J^T(q) K_p \tilde{x} + \dot{q}^T J^T(q) K_e (x - x_e) \quad (4.12)$$

Substituindo (4.10) em (4.12) e utilizando (2.11) tem-se

$$\dot{V} = \dot{q}^T \left[\frac{1}{2} M(q) - C(q, \dot{q}) \right] \dot{q} - \dot{q}^T J^T(q) K_v J(q) \dot{q} \quad (4.13)$$

e sabendo que $\dot{q}^T \left[\frac{1}{2} M(q) - C(q, \dot{q}) \right] \dot{q} = 0$ (ver Lewis et al., 1993), então

$$\dot{V} = -\dot{q}^T J^T(q) K_v J(q) \dot{q} \quad (4.14)$$

que é negativa semi definida. Admitindo que o manipulador não é redundante e que ele não está em uma posição singular, como K_v é escolhida positiva definida $J^T(q) K_v J(q)$ também é positiva definida. Então \dot{V} em (4.14) somente é nula quando $\dot{q} = 0$, e por consequência $\ddot{q} = 0$. Para a condição de equilíbrio ($\ddot{q} = 0, \dot{q} = 0$ e $\dot{x} = 0$), quando $t \rightarrow \infty$, a equação (4.10) resulta

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [K_p \tilde{x} - K_e (x - x_e)] = 0 \quad (4.15)$$

ou isolando x

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_i = \frac{K_{pi} x_{di} + K_{ei} x_{ei}}{K_{pi} + K_{ei}} \quad (4.16)$$

onde o subscrito i refere-se a i -ésima componente de x , x_d e x_e e ao i -ésimo elemento diagonal das matrizes K_p e K_e .

A equação (4.16), semelhante a equação (4.5), mostra que o manipulador não irá para a posição desejada se houver uma restrição ao seu deslocamento, mas para uma posição intermediária entre x_d e x_e , resultando numa força aplicada ao meio, dada pela seguinte relação para a i -ésima componente de força

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f_i = K_{ei} \frac{K_{pi} x_{di} + K_{ei} x_{ei}}{K_{pi} + K_{ei}} \quad (4.17)$$

Como para o caso com um grau de liberdade, quando $K_{ei} \gg K_{pi}$ na direção da tarefa onde está sendo feito o controle de força, o valor de regime permanente para força é aproximadamente

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f_i = K_{pi} (x_{di} - x_{ei}) \quad (4.18)$$

da equação (4.18) observa-se que se a força exercida pelo manipulador sobre o meio na direção i é diretamente proporcional ao ganho K_{pi} do controlador e que a força desejada na direção i em regime permanente é f_{di} , pode-se calcular uma posição desejada correspondente, dentro do meio. Esta posição é

$$x_{di} = \frac{f_{di} + K_{pi}x_{ei}}{K_{pi}} \quad (4.19)$$

Quando o manipulador desloca-se numa direção sem restrição, ou seja, pelo espaço livre, então a posição desejada é facilmente alcançada, o que pode ser visto substituindo $K_{ei} = 0$ na equação (4.16), que resulta em

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_i = x_{di} \quad (4.20)$$

Com isto o projeto do controlador de rigidez consiste em:

- i) nas direções x_i em que o movimento é restrito, definir a posição desejada dentro do meio x_{di} através da expressão (4.19), escolhendo-se K_{pi} de modo a obter a força desejada f_{di}
- ii) nas direções x_i em que o movimento é livre, definir a posição desejada x_{di} , e K_{pi} de acordo com o desempenho dinâmico desejado

4.2 CONTROLE DIRETO DE FORÇA

O controle direto de força caracteriza-se por utilizar o valor lido pelos sensores de força para minimizar ou eliminar o erro de força em relação a um valor desejado previamente estabelecido. Os controladores deste tipo utilizam geralmente um subconjunto do controlador PID (P, PD, PI, etc.).

4.2.1 CONTROLE HÍBRIDO DE FORÇA E POSIÇÃO

A idéia básica no controle híbrido (Raibert et al., 1981 e Chae et al., 1988) é controlar a posição nas direções em que o movimento do efetuador final é livre, e a força nas direções em que o movimento do efetuador final é restrito. Isto é conseguido particionando o espaço de trabalho do manipulador em dois subespaços, um para o controle de posição e outro para o controle de força.

O projeto do controlador é feito a partir do modelo dinâmico do manipulador nas coordenadas da tarefa, escolhidas de forma a facilitar o particionamento do espaço de trabalho (veja seção 1.4). Com a utilização desta formulação, a cada etapa da tarefa, para cada coordenada, realiza-se o controle de força ou de posição, tornando-se então necessário, o uso de dois controladores, uma para força e outro para posição.

O controlador é composto de uma malha interna, onde é realizada a linearização e o desacoplamento do sistema dinâmico do manipulador, e de uma malha externa na qual são feitos os controles de posição e de força. A linearização

e o desacoplamento são feitos de forma semelhante à empregada no método do "torque calculado" (ver Craig, 1986) utilizado no controle de posição no espaço de juntas.

Realizada a linearização, particiona-se o espaço de trabalho selecionando as direções em que o movimento é livre, e as direções nas quais o movimento é restrito. No subespaço das direções em que o movimento é livre utiliza-se um controlador de posição. No subespaço das direções em que o movimento é restrito emprega-se um controlador de força.

O modelo dinâmico do manipulador no espaço da tarefa usado para fins de controle é dado por (2.24)

$$M(q)J_r^{-1}(q)[\ddot{x}_r - \dot{J}_r(q)\dot{q}] + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - J_r^T(q)f_r$$

A linearização e desacoplamento deste modelo pode ser conseguida aplicando o torque

$$\tau = \hat{M}(q)\hat{J}_r^{-1}(q)[a_r - \dot{\hat{J}}_r(q)\dot{q}] + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}(q) + \hat{J}_r^T(q)\hat{f}_r \quad (4.21)$$

onde $\hat{M}(q)$, $\hat{C}(q)$, $\hat{G}(q)$, \hat{f}_r e $\hat{J}_r(q)$ são os valores estimados para $M(q)$, $C(q)$, $G(q)$, f_r e $J_r(q)$, respectivamente, e a_r é um vetor $nx1$ usado para representar os sinais de controle de força e posição definido na sequência.

Se os valores estimados são iguais aos valores reais ($\hat{M}(q) = M(q)$, $\hat{C}(q) = C(q)$, $\hat{G}(q) = G(q)$, $\hat{J}_r(q) = J_r(q)$ e $\hat{f}_r = f_r$). Após a substituição da equação (4.21) na equação (2.24) a malha fechada resultante é

$$\ddot{x}_r = a_r \quad (4.22)$$

Verifica-se assim que aplicando o torque (4.21) nas juntas, o sistema dinâmico do manipulador resulta em um conjunto de seis duplo integradores desacoplados nas direções do sistema de coordenadas da tarefa.

Uma vez que o vetor x_r representa a posição e a orientação do efetuador final no sistema de coordenadas da tarefa, no qual as direções de controle de força e de posição estão desacopladas, é possível escrever x_r como

$$x_r = \Omega_r x_r + \bar{\Omega}_r x_r \quad (4.23)$$

onde $\Omega_r = \text{diag}[\sigma_i]$, com $\sigma_i = 1$ na direção x_{r_i} onde o movimento é livre, e $\sigma_i = 0$ na direção x_{r_i} onde o movimento é restrito, e $\bar{\Omega}_r = I - \Omega_r$, onde I é a matriz identidade $m \times m$. Portanto, as colunas de Ω_r geram o subespaço no qual o movimento é livre, e as colunas de $\bar{\Omega}_r$ geram o subespaço no qual o movimento é restrito.

A matriz Ω_r seleciona as componentes de x_r que descrevem o movimento livre, formando os vetores $\Omega_r x_r$. A matriz $\bar{\Omega}_r$ seleciona as componentes de x_r que descrevem o movimento restrito, formando os vetores $\bar{\Omega}_r x_r$. Por isto, Ω_r e $\bar{\Omega}_r$ são chamadas de matrizes de seleção de posição e de força, respectivamente.

Para melhor exemplificar o conceito de matriz de seleção suponha que quer-se fazer o controle de posição nos eixos x e y , e um controle de força no eixo z de um manipulador cartesiano de 3 graus de liberdade. Adotando $x_r = [x \ y \ z]^T$, então

$$\Omega_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \overline{\Omega}_r = I - \Omega_r = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

onde Ω_r é a matriz de seleção para o controle de posição, $\overline{\Omega}_r$ é a matriz de seleção para o controle de força e I é uma matriz identidade 3×3 .

Efetuada a seleção no sistema (4.22) obtém-se dois subsistemas independentes. Um correspondente às direções nas quais o movimento é livre e o controle é de posição. Em cada uma destas direções tem-se

$$\ddot{x}_{ri} = a_{rpi} \quad (4.25)$$

onde a_{rpi} é o sinal de controle de posição na direção i .

O outro subsistema é formado pelas direções nas quais o movimento é restrito e o controle é de força. Nestas direções tem-se

$$\ddot{x}_{ri} = a_{fi} \quad (4.26)$$

onde a_{fi} é o sinal de controle de força na direção i .

4.2.1.1 Projeto do Controlador de Posição

O controlador de posição é projetado de acordo com o comportamento dinâmico desejado para as direções nas quais o movimento é livre. Empregando um controlador proporcional-derivativo (PD) o sinal a_{rpi} é dado por

$$a_{rpi} = \ddot{x}_{rdi} + k_{vpi}(\dot{x}_{rdi} - \dot{x}_{ri}) + k_{ppi}(x_{rdi} - x_{ri}) \quad (4.27)$$

onde x_{rdi} representa a trajetória desejada na direção i , k_{vpi} e k_{ppi} são constantes positivas representando os ganhos derivativos e proporcionais, respectivamente.

O erro de posição na direção i é $\tilde{x}_{ri} = x_{rdi} - x_{ri}$, e seu comportamento em malha fechada pode ser analisado substituindo a equação (4.27) na equação (4.25)

$$\ddot{\tilde{x}}_{ri} + k_{vpi}\dot{\tilde{x}}_{ri} + k_{ppi}\tilde{x}_{ri} = 0 \quad (4.28)$$

Uma vez que as constantes k_{vpi} e k_{ppi} são positivas, a equação (4.28) indica que $\tilde{x}_{ri} \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$.

Se o movimento é livre em todas as direções (4.27) pode ser escrita como

$$a_{rp} = \ddot{\tilde{x}}_{rd} + k_{vp}\dot{\tilde{x}}_{rd} + k_{pp}\tilde{x}_{rd} \quad (4.29)$$

onde \tilde{x}_{rd} representa o vetor de trajetória desejada, e k_{pp} , k_{vp} são matrizes diagonais.

Havendo restrições ao movimento pode-se calcular o sinal de controle de posição através de (4.29) e selecionar as direções em que o movimento é livre através da matriz Ω_r definida anteriormente, obtendo a parcela do vetor de controle a_r que executa o controle de posição $\Omega_r a_{rp}$.

4.2.1.2 Projeto do Controlador de Força

O projeto do controle de força é feito considerando o meio como uma mola, rigidez k_{ei} na direção i . Desta forma, a força aplicada pelo manipulador na direção i é

$$f_{ri} = k_{ei}(x_{ri} - x_{rei}) \quad (4.30)$$

onde x_{rei} é a posição do meio na direção i descrito no sistema de coordenadas da tarefa $\mathcal{R}(O_r, x_r, y_r, z_r)$. A derivada segunda da equação (4.30) em relação ao tempo é

$$\ddot{f}_{ri} = k_{ei}\ddot{x}_{ri} \quad (4.31)$$

Assim, usando a expressão (4.26)

$$\ddot{f}_{ri} = k_{ei}a_{rri} \quad (4.32)$$

O controlador de força é então projetado de acordo com o comportamento dinâmico desejado para as direções nas quais o movimento é restrito. Usando um controlador proporcional-derivativo (PD), o sinal a_{rfi} pode ser dado por

$$a_{rfi} = k_{ei}^{-1} [\ddot{f}_{rdi} + k_{vfi}(\dot{f}_{rdi} - \dot{f}_{ri}) + k_{pfi}(f_{rdi} - f_{ri})] \quad (4.33)$$

onde f_{rdi} representa a força desejada na direção i , k_{pfi} e k_{dfi} são constantes positivas representando os ganhos proporcional e derivativo respectivamente.

O erro de força na direção i é $\tilde{f}_{ri} = f_{rdi} - f_{ri}$, e seu comportamento em malha fechada pode ser analisado substituindo a equação (4.33) na equação (4.32)

$$\ddot{\tilde{f}}_{ri} + k_{vfi}\dot{\tilde{f}}_{ri} + k_{pfi}\tilde{f}_{ri} = 0 \quad (4.34)$$

Como as constantes k_{pfi} e k_{dfi} são positivas, pela equação (4.34) $\tilde{f}_{ri} \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$.

Se o movimento é restrito em todas as direções (4.33) pode ser escrita como

$$a_{rf} = k_e^{-1} (\ddot{f}_{rd} + k_{vrf}\dot{\tilde{f}}_{rd} + k_{prf}\tilde{f}_{rd}) \quad (4.35)$$

onde f_{rd} representa o vetor de força desejada e k_e , k_{vrf} , k_{prf} são matrizes diagonais.

Havendo restrições ao movimento pode-se calcular o sinal de controle de força através de (4.35) e selecionar as direções em que o movimento é livre através

da matriz $\bar{\Omega}_r$ definida anteriormente, obtendo a parcela do vetor de controle a_r que executa o controle de força $\bar{\Omega}_r a_{rf}$.

Assim, o vetor a_r pode ser dado por

$$a_r = \Omega_r a_{rp} + \bar{\Omega}_r a_{rf} \quad (4.36)$$

Usando (4.29), (4.35) e (4.36) a lei de controle (4.21) resulta

$$\tau = -\hat{M}\hat{J}_r^{-1}\hat{J}_r\dot{q} + \hat{C}\dot{q} + \hat{G} + \hat{J}_r^T \hat{f}_r + \hat{M}\hat{J}_r^{-1} \left[\Omega_r (\ddot{x}_{rd} + k_{vp}\dot{\tilde{x}}_r + k_{pp}\tilde{x}_r) + \bar{\Omega}_r k_e^{-1} (\ddot{f}_{rd} + K_{vf}\dot{\tilde{f}}_r + K_{pf}\tilde{f}_r) \right] \quad (4.37)$$

Na Figura 4.2 pode-se ver esquematicamente o funcionamento do controle híbrido

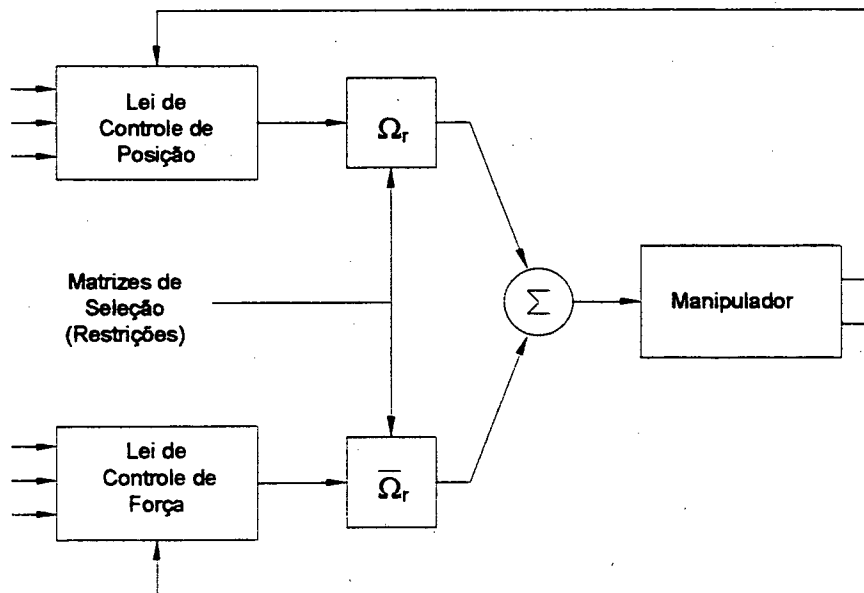


Figura 4.2 - Esquema do funcionamento do controle híbrido

4.2.2 Controle no Espaço Operacional

O controle no espaço operacional foi desenvolvido por Khatib (1987) a partir do controle híbrido. Neste controlador, as direções em que o movimento é livre e as direções nas quais o movimento é restrito também são selecionadas como no controle híbrido. Entretanto, como o mecanismo de seleção é implementado no mesmo sistema de coordenadas onde a geometria, cinemática e dinâmica do manipulador estão formuladas, isto permite que o movimento seja descrito e as forças sejam medidas diretamente no espaço operacional, o que aumenta a eficiência da implementação do sistema em tempo real. A seleção das direções de controle de força e posição é realizada a partir de uma generalização das matrizes de seleção.

4.2.2.1 Generalização das Matrizes de Seleção.

Seja f_u um vetor unitário na direção da força aplicada pelo efetuador final, expresso no sistema de coordenadas operacionais $R_o(O, x, y, z)$. Seja $R_t(O, x_t, y_t, z_t)$ um sistema de coordenadas conveniente para a descrição das tarefas envolvendo movimentos restritos, de tal forma que z_t seja alinhado com f_u . Seja S_t a matriz de rotação do sistema de coordenadas da tarefa $R_t(O, x_t, y_t, z_t)$ em relação ao sistema de coordenadas operacionais $R_o(O, x, y, z)$.

A matriz de seleção de posição indica as direções ao longo das quais o movimento é livre no sistema de coordenadas $R_t(O, x_t, y_t, z_t)$. É definida como

$$\Sigma_f = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

onde σ_x , σ_y , σ_z são números binários, aos quais se atribui valor 1 (um) se o movimento é livre na direção do respectivo eixo (x, y ou z), e 0 (zero) se o movimento é restrito. Caso não haja nenhuma restrição ao movimento do manipulador não há força aplicada e o sistema de coordenadas R_f é assumido como igual ao sistema de coordenadas R_o . Neste caso a matriz de rotação S_f é a matriz identidade.

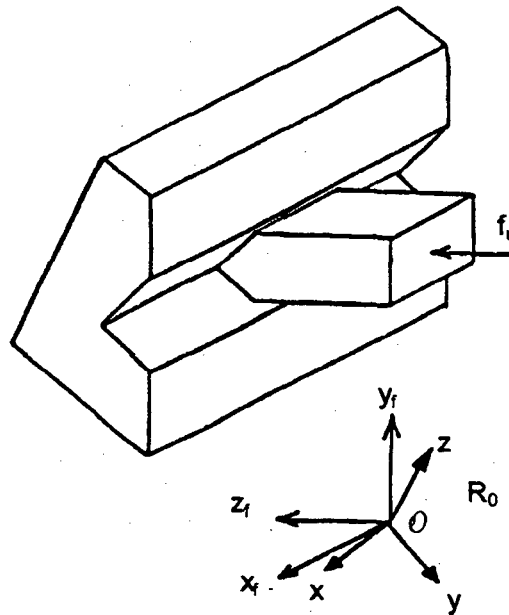


Figura 4.3 - Movimento com um grau de liberdade (Khatib, 1987).

As direções para o controle de força são selecionadas pela matriz de seleção de força $\bar{\Sigma}_f$, associada à Σ_f , que é definida por

$$\bar{\Sigma}_f = I - \Sigma_f \quad (4.39)$$

onde I é a matriz identidade 3×3 .

Caso a tarefa envolva restrição de rotações e momentos aplicados no efetuador final, o vetor dos momentos que estão sendo aplicados no efetuador final, no sistema de coordenadas $R_o(O, x, y, z)$ é τ_u . O sistema de coordenadas $R_r(O, x_r, y_r, z_r)$ é definido de tal forma que z_r esteja alinhado com o vetor de momento τ_u . A matriz de rotação S_r representa a rotação do sistema $R_r(O, x_r, y_r, z_r)$ para o sistema operacional $R_o(O, x, y, z)$. Em R_r a liberdade de rotação do efetuador final está no subespaço que se estende sobre o plano definido por $\{x_r, y_r\}$. Para tarefas que envolvam restrições de rotações e momentos aplicados no efetuador final, no sistema de coordenadas R_r , define-se as matrizes de seleção das rotações e momentos como Σ_r e $\bar{\Sigma}_r$ respectivamente, que são definidas similarmente à Σ_f e $\bar{\Sigma}_f$.

No sistema $R_f(O, x_f, y_f, z_f)$ a seleção das posições é feita através de Σ_f e a das forças através de $\bar{\Sigma}_f$. Considerando a definição da matriz de rotação S_f , no sistema operacional $R_o(O, x, y, z)$ a seleção das posições é feita através da matriz $S_f^T \Sigma_f S_f$ e a seleção das força é feita através da matriz $S_f^T \bar{\Sigma}_f S_f$.

No sistema $R_r(O, x_r, y_r, z_r)$ a seleção das rotações é feita através de Σ_r e a dos momentos através de $\bar{\Sigma}_r$. Considerando a definição da matriz de rotação S_r , no sistema operacional $R_o(O, x, y, z)$ a seleção das rotações é feita através da matriz $S_r^T \Sigma_r S_r$ e a seleção dos momentos é feita através da matriz $S_r^T \bar{\Sigma}_r S_r$.

Com estes resultados, define-se a matriz de seleção de posições e rotações generalizadas Ω , e a matriz de seleção das forças e momentos generalizados $\bar{\Omega}$, da seguinte forma

$$\Omega = \begin{bmatrix} S_f^T \Sigma_f S_f & 0 \\ 0 & S_r^T \Sigma_r S_r \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

e

$$\bar{\Omega} = \begin{bmatrix} S_f^T \bar{\Sigma}_f S_f & 0 \\ 0 & S_r^T \bar{\Sigma}_r S_r \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

As matrizes de seleção Ω e $\bar{\Omega}$ atuam nos vetores descritos no sistema de coordenadas operacional R_o . Por exemplo, um vetor de comando de posição inicialmente expresso em R_o é transformado através da matriz de rotação S_r para o sistema de coordenadas da tarefa R_r . As direções para o movimento são então selecionadas pela aplicação de Σ_r e finalmente o vetor resultante é transformado novamente para o sistema operacional R_o por S_r^T .

O objetivo na construção das matrizes generalizadas de seleção, é obter um processo de seleção no sistema de coordenada operacional R_o , que é o sistema de coordenadas onde a geometria, a cinemática, e modelo dinâmico do manipulador estão formulados. Isto permite uma implementação de sistemas de controle em tempo real mais eficiente (Khatib, 1986).

As matrizes generalizadas de seleção no espaço operacional Ω e $\bar{\Omega}$ podem ser tanto constantes quanto variantes no tempo. As matrizes variantes no

tempo correspondem à tarefas onde existe mudança da direção da aplicação de forças ou momentos.

4.2.2.2 O Controlador no Espaço Operacional.

Como no controle híbrido, o controlador no espaço operacional é composto de uma malha interna na qual o sistema dinâmico é linearizado e desacoplado e, de uma malha externa onde são feitos os controles de força e posição. A linearização e o desacoplamento são realizados de forma semelhante à empregada no método do “torque calculado” (ver Craig, 1986) utilizado no controle de posição no espaço de juntas.

O modelo dinâmico do manipulador no espaço operacional usado para fins de controle é dado por (2.19)

$$M(q)J^{-1}(q)(\ddot{x} - \dot{J}(q)\dot{q}) + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - J^T(q)f$$

A linearização e desacoplamento deste modelo pode ser conseguida aplicando o torque

$$\tau = \hat{M}(q)\hat{J}^{-1}(q)(\ddot{a} - \dot{\hat{J}}(q)\dot{q}) + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}(q) + \hat{J}^T(q)\hat{f} \quad (4.42)$$

onde $\hat{M}(q)$, $\hat{C}(q)$, $\hat{G}(q)$ são os valores estimados para $M(q)$, $C(q)$, $G(q)$, respectivamente, \hat{J} é o valor estimado do Jacobiano, \hat{f} é o vetor de forças e torques medido no efetuador final, definido no sistema de coordenadas operacional, e a é um vetor $nx1$ usado para representar os sinais de controle de força e posição, definido na sequência.

Se os valores estimados são iguais aos valores reais ($\hat{M}(q) = M(q)$, $\hat{C}(q) = C(q)$, $\hat{G}(q) = G(q)$, $\hat{J}(q) = J(q)$ e $\hat{f} = f$). Após a substituição da equação (4.42) na equação (2.19) a malha fechada resultante é

$$\ddot{x} = a \quad (4.43)$$

Uma vez que o vetor x representa a posição e a orientação do efetuador final no espaço operacional, no qual as direções de controle de força e de posição podem ser desacopladas com o uso das matrizes de seleção Ω e $\overline{\Omega}$, então é possível escrever x como

$$x = \Omega x + \overline{\Omega} x \quad (4.44)$$

Seja a_p um vetor de controle de posição para o sistema (4.43), e seja a_f um vetor de controle de força para o sistema (4.43). O controle de posição é feito nas direções em que o movimento é livre, que são seleccionadas pela matriz Ω . O controle de força é feito nas direções em que o movimento é restrito, que são seleccionadas pela matriz $\overline{\Omega}$. Assim, o vetor de controle a , definido em (4.43) é dado por

$$a = \Omega a_p + \bar{\Omega} a_f \quad (4.45)$$

Como no controle híbrido, o meio novamente é modelado como uma mola descrita por uma matriz de rigidez K_e . Desta forma, a força aplicada pelo manipulador no meio é

$$f = K_e(x - x_e) \quad (4.46)$$

onde x_e é o vetor que representa a posição do meio no espaço operacional.

Usando-se um controlador Proporcional-Derivativo para posição e outro para força, a lei de controle resulta

$$\begin{aligned} \tau = & -\hat{M}\hat{J}^{-1}\hat{J}\dot{\hat{q}} + \hat{C}\dot{\hat{q}} + \hat{G} + \hat{J}^T\hat{f} + \\ & + \hat{M}\hat{J}^{-1}\left[\Omega(\ddot{x}_d + K_{vp}\dot{\tilde{x}} + K_{pp}\tilde{x}) + \bar{\Omega}K_e^{-1}(\ddot{f}_d + K_{vf}\dot{\tilde{f}} + K_{pf}\tilde{f})\right] \end{aligned} \quad (4.47)$$

onde x_d é a trajetória desejada, $\tilde{x} = x_d - x$ é o erro de posição, f_d é a força desejada, $\tilde{f} = f_d - f$ é o erro na força f , $K_{pp} = K_{pp}^T > 0$ e $K_{pf} = K_{pf}^T > 0$ são matrizes de ganhos proporcionais para o controlador de posição e força, respectivamente, e $K_{vp} = K_{vp}^T > 0$ e $K_{vf} = K_{vf}^T > 0$ são matrizes de ganhos derivativo, para o controlador de posição e força, respectivamente.

Na Fig. 4.4 pode-se ver esquematicamente o funcionamento do controle no espaço operacional

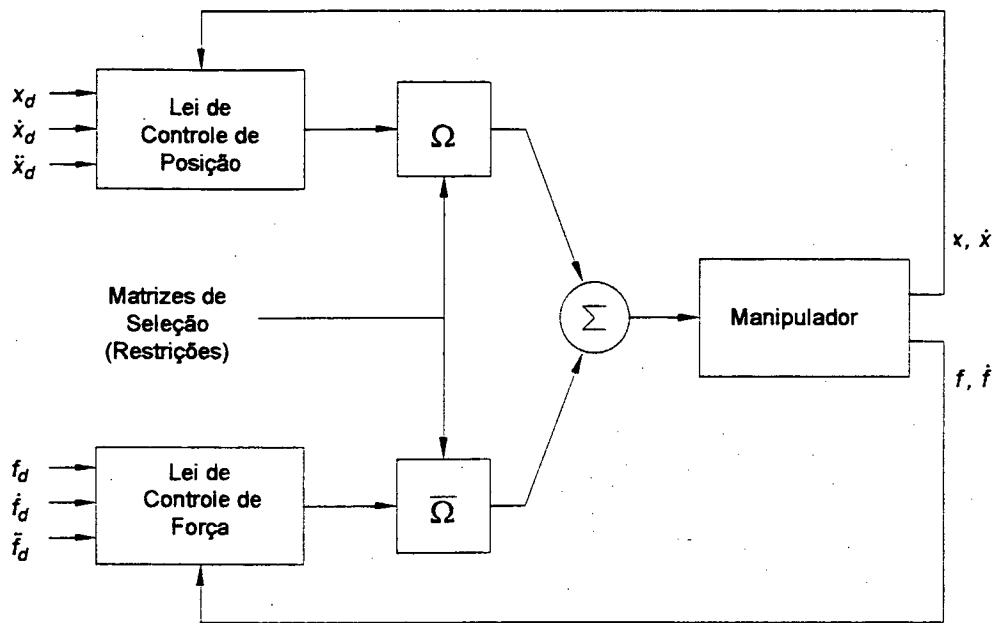


Figura 4.4 - Esquema do funcionamento do controle no espaço operacional.

A lei de controle apresentado originalmente por Khatib (1987), é

$$\begin{aligned} \tau = & -\hat{M}\hat{J}^{-1}\dot{\hat{J}}\dot{q} + \hat{C}\dot{q} + \hat{G} + \hat{J}^T\hat{f} + \\ & + \hat{M}\hat{J}^{-1}\left[\Omega(\ddot{x}_d + K_{vp}\dot{\tilde{x}} + K_{pp}\tilde{x}) + \bar{\Omega}K_e^{-1}K_{vf}\dot{\tilde{f}}\right] + J^T\bar{\Omega}(K_{pf}\tilde{f} + f_d) \end{aligned} \quad (4.48)$$

As equações (4.47) e (4.48) são iguais no que se refere ao controle de posição. No controle de força há diferenças. No algoritmo proposto por Khatib, equação (4.48), o termo $\bar{\Omega}K_e^{-1}K_{vf}\dot{\tilde{f}}$ não prevê a existência de uma velocidade desejada para força, ou seja, $\dot{f}_d = 0$. O termo $J^T\bar{\Omega}(K_{pf}\tilde{f} + f_d)$ é o responsável pelo controle proporcional de força e pela compensação da força exercida pelo manipulador no meio, sendo que esta é feita sobre a força desejada, e não sobre a força que realmente o manipulador exerce no meio.

4.2.3. CONTROLE PARALELO

A necessidade de um conhecimento matemático detalhado do meio com o qual um manipulador irá interagir, é uma dificuldade extra no projeto da maioria dos controladores de força. O controle paralelo proposto por Chiaverini e Sciavicco (1993) tem como objetivo estabelecer o controle de força e de posição no espaço operacional, sem empregar um mecanismo explícito de seleção das direções em que é feito o controle de posição e das direções em que é feito o controle de força. Isto faz com que seja necessário um menor conhecimento das características do meio com o qual o manipulador irá interagir.

O controle paralelo baseia-se em dois controladores agindo em paralelo, gerenciando as situações de conflito através de uma estratégia de prioridade. A prioridade é dada ao controlador de força que é projetado para prevalecer sobre o controlador de posição.

Adotando esta prioridade o sistema resultante é capaz de acomodar forças originalmente não previstas através de desvios na trajetória desejada, desde que seja adotada uma estratégia de tarefas independentes. Com isso é possível a recuperação de impactos não planejados tornando-se desnecessário o uso de mecanismos de seleção.

4.2.3.1 O controlador Paralelo

No controle paralelo o modelo dinâmico do manipulador (2.19)

$$M(q)J^{-1}(q)(\ddot{x} - \dot{J}(q)\dot{q}) + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau - J^T(q)f$$

é linearizado e desacoplado aplicando um torque com a forma

$$\tau = \hat{M}(q)\hat{J}^{-1}(q)(a - \dot{\hat{J}}(q)\dot{q}) + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}(q) + \hat{J}^T(q)\hat{f} \quad (4.49)$$

onde $\hat{M}(q)$, $\hat{C}(q)$, $\hat{G}(q)$ são os valores estimados para $M(q)$, $C(q)$, $G(q)$, respectivamente, \hat{J} é o valor estimado do Jacobiano, \hat{f} é o vetor de forças e torques medido no efetuador final, definido no sistema de coordenadas operacional, e a é um vetor $n \times 1$ usado para representar as estratégias de controle linear de força e posição, que é definido na sequência.

Se os valores estimados são iguais aos valores reais ($\hat{M}(q) = M(q)$, $\hat{C}(q) = C(q)$, $\hat{G}(q) = G(q)$, $\hat{J}(q) = J(q)$ e $\hat{f} = f$). Após a substituição da equação (4.49) na equação (2.19) a malha fechada resultante é

$$\ddot{x} = a \quad (4.50)$$

Observe pela Fig. 4.5, que devido a estrutura do compensador assumido, o projeto dos controladores de posição e de força é feito separadamente. Portanto

propõe-se como vetor de controle para o sistema

$$a = a_p + a_f \quad (4.51)$$

onde a_p é o vetor de controle de posição e a_f é o vetor de controle de força.

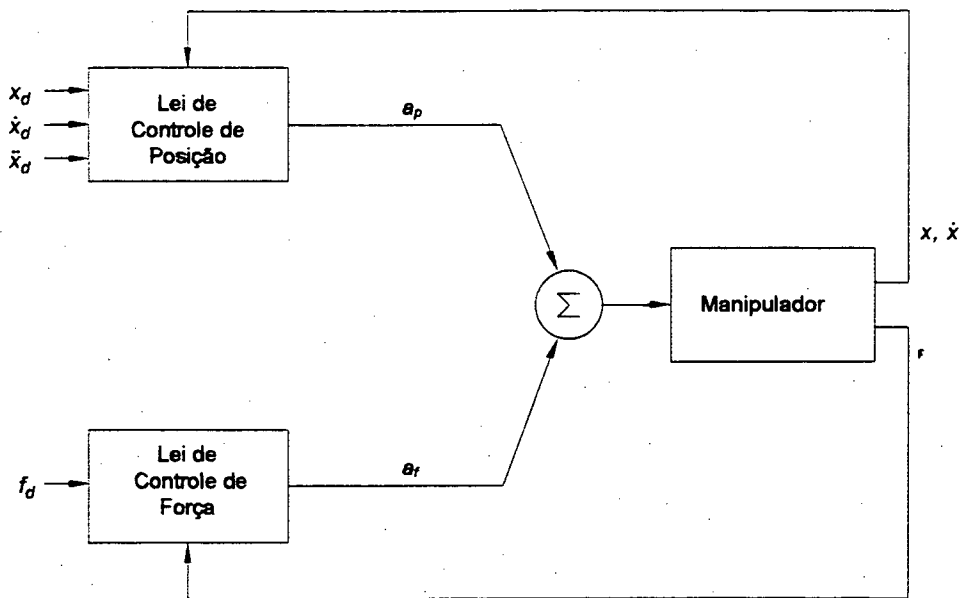


Figura 4.5 - Estrutura do controlador paralelo.

Para fazer prevalecer o laço de controle de força sobre o de posição, adota-se o uso um controlador PD para a posição e um PI (Proporcional-Integral) para a força, ou seja,

$$a_p = \ddot{x}_d + K_v(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_p(x_d - x) \quad (4.52)$$

$$a_f = K_f(f_d - f) + K_i \int_0^t (f_d - f) d\tau \quad (4.53)$$

onde $K_p = K_p^T > 0$, $K_v = K_v^T > 0$ são as matrizes de ganhos proporcionais e derivativos do controlador de posição, respectivamente, e $K_f = K_f^T > 0$, $K_i = K_i^T > 0$ são respectivamente as matrizes de ganhos proporcionais e integrais do controlador de força.

Empregando as definições de erro de posição e erro de força utilizadas anteriormente, e substituindo (4.52) e (4.53) em (4.51) e este resultado no sistema linearizado a equação do erro em malha fechada resulta

$$\ddot{\tilde{x}} + K_v \dot{\tilde{x}} + K_p \tilde{x} + K_f \tilde{f} + K_i \int_0^t \tilde{f} d\eta = 0 \quad (4.54)$$

Derivando esta equação em relação ao tempo tem-se

$$\ddot{\tilde{x}} + K_v \dot{\tilde{x}} + K_p \tilde{x} + K_f \tilde{f} + K_i \tilde{f} = 0 \quad (4.55)$$

Para uma situação estacionária ($\ddot{\tilde{x}} = 0$, $\dot{\tilde{x}} = 0$, $\tilde{x} = 0$) o erro de força é governado por

$$K_f \tilde{f} + K_i \tilde{f} = 0 \quad (4.56)$$

e como K_f e K_i são positivas definidas, \tilde{f} tende para zero exponencialmente quando $t \rightarrow \infty$. Então a integral do erro de força $\int_0^t \tilde{f} d\eta$ tende para uma constante limitada e

da equação (4.54) conclui-se que o erro de posição tende para uma constante. Isto mostra a prioridade do controle de força sobre o de posição.

A lei de controle resultante é

$$\tau = \hat{M}\hat{J}^{-1}\dot{\hat{J}}^{-1}\dot{q} + \hat{C}\dot{q} + \hat{G} + \hat{J}^T \hat{f} + \hat{M}\hat{J}^{-1} \left[\ddot{x}_d + K_v \dot{\tilde{x}} + K_p \tilde{x} + K_f \tilde{f} + K_i \int_0^t \tilde{f} d\eta \right] \quad (4.57)$$

Deve ser ressaltado que os laços de controle de força e posição devem ser projetados levando-se em conta a pior situação em que o controlador irá funcionar, independente da geometria do contato (Chiaverini e Sciavicco, 1993).

A análise de Chiaverini e Sciavicco (1993) para a performance do controle paralelo esta baseada num caso simples onde o manipulador entra em contato com um meio elástico, e aplica forças lineares através de um movimento de translação. Neste caso, onde a força é aplicada em apenas uma direção, a estabilidade do manipulador foi demonstrada. Entretanto para casos mais complexos, como no caso de uma superfície curva, os autores mostram que as dificuldades de análise crescem consideravelmente. Isto provém do fato do controlador paralelo particionar o espaço de trabalho a partir de informações dos sensores de força e de posição, e não através de um mecanismo explícito como as matrizes de seleção usadas no controle híbrido e no espaço operacional.

O projeto de uma malha de controle de força dominante em (4.51) resulta na acomodação do movimento do manipulador às restrições geométricas impostas pela tarefa, sem requerer a descrição da tarefa em termos das matrizes de seleção. Se, no entanto, o erro de força \tilde{f} não for levado para zero, ocorre um desvio

contínuo da posição desejada do manipulador, conforme pode ser observado pela equação (4.54) (Chiaverini e Sciavicco, 1993).

Este desvio pode ser originado por erros no planejamento da tarefa, problemas na implementação, assim como por erros na compensação de cargas no efetuator final (Chiaverini e Sciavicco, 1993).

4.3 O PLANEJAMENTO DA TAREFA E A IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR

Para que a realização final da tarefa ocorra de maneira satisfatória é necessário que se implemente um controlador que atenda a todas as necessidades da tarefa. A escolha do controlador ideal deve ser tal que este seja o mais simples possível e, ainda assim, atenda de forma adequada a todas as características da tarefa.

4.3.1 Controle de Rigidez

O controle de rigidez é realizado implementando-se o torque de controle dado por (4.9)

$$\tau = J^T(q)(-K_v \dot{\tilde{x}} + K_p \tilde{x}) + \hat{G}(q)$$

Esta implementação implica em:

i - planejar a realização da tarefa

- definindo o sistema de coordenadas da base do manipulador;
- estabelecendo a trajetória desejada em termos das posições no sistema de coordenadas da base do manipulador, que são definidas da seguinte maneira:

- a) nas direções x_i em que o movimento é restrito, definir a posição desejada dentro do meio x_{di} através da expressão (4.19), escolhendo-se K_{pi} de modo a obter a força desejada f_{di}
- b) nas direções x_i em que o movimento é livre, definir a posição desejada x_{di} , e K_{pi} de acordo com o desempenho dinâmico desejado

ii - definir os ganhos para o sistema de acordo com o desempenho desejado;

iii - implementar o torque de controle estabelecido em (4.9)

- medindo os vetores x e \dot{x} ;
- calculando matriz transposta do Jacobiano do manipulador;
- estimando os torques gravitacionais.

4.3.2 Controle Híbrido de Força e Posição

O controle híbrido de força e posição é realizado implementando-se o torque de controle dado por (4.37)

$$\tau = -\hat{M}\hat{J}_r^{-1}\hat{J}_r\dot{q} + \hat{C}\dot{q} + \hat{G} + \hat{J}_r^T \hat{f}_r + \\ + \hat{M}\hat{J}_r^{-1} \left[\Omega_r (\ddot{x}_{rd} + k_{vp}\dot{\tilde{x}}_r + k_{pp}\tilde{x}_r) + \overline{\Omega}_r K_e^{-1} (\ddot{f}_{rd} + K_{vf}\dot{\tilde{f}}_r + K_{pf}\tilde{f}_r) \right]$$

Esta implementação implica em:

i - planejar a realização da tarefa

- definindo o sistema de coordenadas da tarefa;
- estabelecendo a trajetória desejada em termos das posições no sistema de coordenadas da tarefa;
- estabelecendo a força desejada, no sistema de coordenadas da tarefa;
- definindo-se as matrizes de seleção para a posição Ω_r e para força $\overline{\Omega}_r$;

ii - definir os ganhos para o sistema;

- no controle de posição, através de (4.27);
- no controle de força, através de (4.29);

iii - implementar o torque de controle estabelecido em (4.37)

- calculando os vetores q e \dot{q} ;

- medindo os vetores f_r e \dot{f}_r ;
- estimando a matriz de rigidez do meio K_e ;
- calculando-se a matriz do Jacobiano da tarefa J_r , sua derivada e sua Inversa ;
- estimando os torques gravitacionais.
- estimando os torques centrífugos e de Coriolis
- estimando a matriz de inércia do manipulador

4.3.3 Controle no Espaço Operacional

O controle no espaço operacional é realizado implementando-se o torque de controle dado por (4.47)

$$\tau = -\hat{M}\hat{J}^{-1}\dot{\hat{J}}\dot{q} + \hat{C}\dot{q} + \hat{G} + \hat{J}^T \hat{f} + \\ + \hat{M}\hat{J}^{-1} \left[\Omega (\ddot{x}_d + K_{vp}\dot{\tilde{x}} + K_{pp}\tilde{x}) + \bar{\Omega} K_e^{-1} (\ddot{f}_d + K_{vf}\dot{\tilde{f}} + K_{pf}\tilde{f}) \right]$$

Esta implementação implica em:

- planejar a realização da tarefa
 - definindo o sistema de coordenadas operacional;
 - estabelecendo a trajetória desejada em termos das posições no sistema de coordenadas operacional;

- estabelecendo o vetor forças desejada, no sistema de coordenadas da tarefa;
- definindo as matrizes de rotação S_f e S_τ
- definindo as matrizes de seleção para a posição Σ_f e para força Σ_τ ;

ii - definir os ganhos para o sistema;

- no controle de posição, através de (4.27);
- no controle de força, através de (4.29);

iii - implementar o torque de controle estabelecido em (4.47)

- calculando os vetores q e \dot{q} ;
- medindo os vetores f e \dot{f} ;
- estimando a matriz de rigidez do meio K_e ;
- calculando a matriz do Jacobiano do manipulador J , sua derivada e sua inversa ;
- estimando os torques gravitacionais.
- estimando os torques centrífugos e de Coriolis
- estimando a matriz de inércia do manipulador

4.3.4 Controle Paralelo

O controle paralelo é executado no espaço operacional, através torque de controle dado por (4.57)

$$\tau = \hat{M}\hat{J}^{-1}\dot{\hat{J}}^{-1}\dot{q} + \hat{C}\dot{q} + \hat{G} + \hat{J}^T \hat{f} + \hat{M}\hat{J}^{-1} \left[\ddot{x}_d + K_v \dot{\tilde{x}} + K_p \tilde{x} + K_f \tilde{f} + K_i \int_0^t \tilde{f} d\eta \right]$$

Esta implementação implica em:

i - planejar a realização da tarefa

- definindo o sistema de coordenadas operacional;
- estabelecendo a trajetória desejada em termos das posições no sistema de coordenadas operacional;
- estabelecendo o vetor forças desejada, no sistema de coordenadas operacional;

ii - definir os ganhos para o sistema;

- no controle de posição, através de (4.52);
- no controle de força, através de (4.53);

iii - implementar o torque de controle estabelecido em (4.57)

- calculando os vetores q e \dot{q} ;
- medindo o vetor f ;
- estimando a matriz de rigidez do meio K_e ;
- calculando a matriz do Jacobiano do manipulador J , sua derivada e sua inversa ;
- estimando os torques gravitacionais.
- estimando os torques centrífugos e de Coriolis

- estimando a matriz de inércia do manipulador

4.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS RELATIVAS AO USO DOS DOS CONTROLADORES

4.4.1 Vantagens no Uso do Controle de Rigidez

- Fácil implementação. Uma vez que este método baseia-se em posicionar o manipulador dentro do meio, é necessário apenas calcular os vetores x e \dot{x} através da leitura de q e \dot{q} , isto é conseguido através das equações (2.3) e (2.11), respectivamente não existindo a necessidade da leitura da força que está sendo exercida no meio.

4.4.2 Desvantagens no Uso do Controle de Rigidez

- É necessário um conhecimento perfeito da posição e orientação da superfície e rigidez do meio (x_e) onde a tarefa é executada, uma vez que é preciso informar a posição desejada do manipulador dentro do meio.
- Este método de controle não admite situações fora das que foram planejadas. No caso do manipulador encontrar um obstáculo não planejado, ele não tomará conhecimento de sua existência, tentando

posicionar-se na posição desejada. Isto irá gerar forças indesejáveis, que podem por em risco o andamento da tarefa ou mesmo causar danos ao manipulador.

4.4.3 Vantagens no Uso do Controlador Híbrido

- O desacoplamento entre os controles de força e posição possibilita a utilização de dois controladores, um para força e outro para posição, que podem ser projetados separadamente, sendo portanto, possível atribuir-se comportamentos dinâmicos diferentes para a força e para a posição.

4.4.4 Desvantagens no Uso do Controlador Híbrido

- Quando houver mudança nas características geometria da tarefa são necessárias novas matrizes de seleção para força e para posição. Caso esta nova estrutura de controle não esteja de acordo com as características da tarefa, é possível que o manipulador descreva trajetórias de força e posição não desejadas, e portanto, pondo em risco a realização da tarefa.
- Este controlador por estar baseado num mecanismo de seleção lógico e previamente definido, ignora as leituras dos sensores. No caso de ocorrer um choque do manipulador com algum obstáculo numa direção onde esta

se fazendo o controle de posição, o controlador irá ignorar a leitura do sensor de força ao invés de utiliza-la para superar este obstáculo.

- As características geométricas e físicas do meio onde se realizará a tarefa devem ser plenamente conhecidas, pois este controlador não admite erros de planejamento na tarefa. Isto implica num modelo matemático do meio e da interação do manipulador com este, bastante precisos, o que frequentemente é muito difícil de obter, devido a complexidade dos fenômenos físicos envolvidos durante a interação (Chiaverini e Sciavicco, 1994).

- Necessidade da medida da derivada da força. Geralmente a medida de força é muito ruidosa e por este motivo uma derivada da força não corresponderia exatamente ao valor correto sem ruídos. Uma alternativa para esta dificuldade é escrever a derivada da força como

$$\dot{f}_j = K_{ej} \dot{x}_j.$$

que está em termos da medida da velocidade na j-ésima coordenada da tarefa.

- não é possível a realização de operações de auto ajuste à pequenos erros de trajetória ou recuar de uma situação de impacto não planejada.

4.4.5 Vantagens no Uso do Controle Operacional

- A descrição da tarefa é feita diretamente no sistema de coordenadas da base do manipulador. Isto permite que o movimento seja descrito e as forças sejam medidas diretamente no espaço operacional.

4.4.6 Desvantagens no Uso do Controle Operacional

- As desvantagens do controle no espaço operacional são as mesmas apresentadas para o controle híbrido de força e posição (ver seção 4.4.4)

4.4.7 Vantagens no Uso do Controle Paralelo

- A descrição da tarefa é feita diretamente no sistema de coordenadas operacional.
- Possibilidade de desvios de obstáculo não planejados, pois as medidas dos sensores estão sempre disponíveis e, é dada prioridade ao controle de força.
- Requer um menor conhecimento matemático da posição do meio, entretanto é necessário o conhecimento preciso da orientação da superfície do meio.
- Não é necessário o uso de matrizes de seleção.

4.4.8 Desvantagens no Uso do Controle Paralelo

- Em tarefas mal planejadas quando o manipulador não toca o meio, existe a possibilidade do manipulador tornar-se instável deslocando-se até encontrar um obstáculo.
- Em movimentos no espaço livre, não é possível obter os valores da trajetória desejada para posição. O uso do controle PD para a posição implica em um erro de regime estacionário para posição, de acordo com o ganho utilizado.
- Erros de planejamento na direção da força que o manipulador deve aplicar no meio, podem levar o manipulador a um comportamento instável.

CAPÍTULO 5

PROJETO DE UM CONTROLADOR DE FORÇA PARA UM MANIPULADOR COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE

Neste capítulo, apresenta-se o projeto dos controladores de força para tarefas descritas no espaço operacional, ou no sistema de coordenadas da tarefa. Isto é feito com o objetivo de melhor fixar os assuntos tratados anteriormente. Para isto descreve-se passo a passo todos os elementos necessários para a implementação dos métodos de controle de força e posição: controle de rigidez, controle no espaço operacional, controle híbrido no sistema de coordenadas da tarefa e o controle paralelo.

Ainda na sequência, os controladores aqui projetados são analisados.

5.1 DESCRIÇÃO DAS TAREFAS

Para avaliar posteriormente o comportamento do manipulador, descrito na sequência, o projeto do controlador é feito para três meios com características geométricas diferentes. No primeiro caso a tarefa é realizada em um plano vertical

(Fig. 5.1), no segundo caso em um plano inclinado (Fig. 5.2), e no terceiro caso em uma superfície curva (Fig. 5.3).

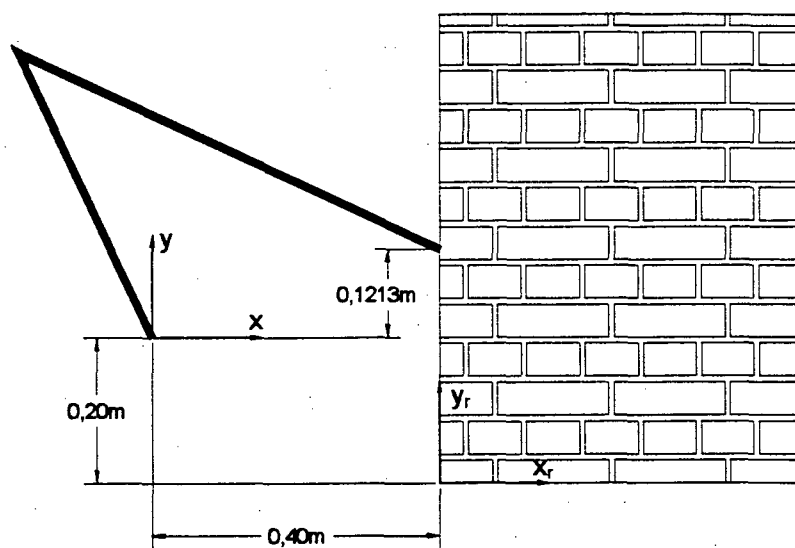


Figura 5.1 - Geometria do caso 1, para as tarefas T1, T2, T3 e T4.

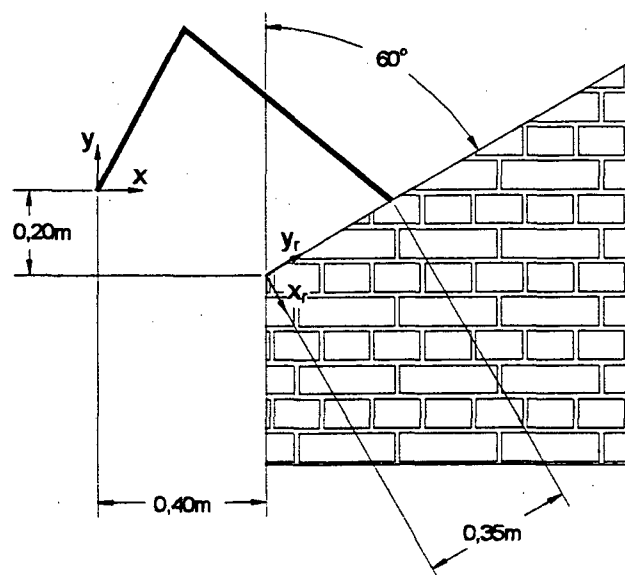


Figura 5.2 - Geometria do caso 2, para as tarefas T1, T2, T3 e T4.

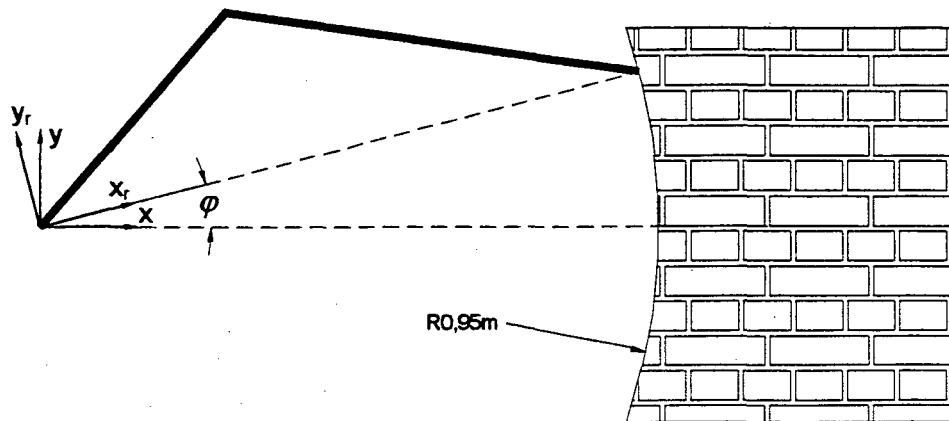


Figura 5.3 - Geometria do caso 3, para as tarefas T1, T2, T3 e T4.

Para cada caso, são realizadas 4 tarefas distintas:

Tarefa 1 (T1) - Posicionar o manipulador em um ponto fixo, enquanto este aplica no meio uma força constante no tempo (exemplo: colagem de objetos);

Tarefa 2 (T2) - Posicionar o manipulador em um ponto fixo enquanto este aplica no meio, uma força variável no tempo;

Tarefa 3 (T3) - Deslocar o manipulador segundo uma trajetória, enquanto este exerce no meio uma força constante (exemplo: polimento);

Tarefa 4 (T4) - Deslocar o manipulador segundo uma trajetória, enquanto este exerce no meio, uma força variável no tempo.(exemplo: usinagem, escrita).

5.2 DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS NOS QUAIS AS TAREFAS SERÃO EXECUTADAS

5.2.1 Caso 1: Plano Vertical

O plano vertical no qual o manipulador executa as tarefas, mostrado na Fig. 5.1, está localizado a uma distância $x = 0,40$ m da base do manipulador.

Durante as tarefas T1 e T3 deseja-se que o manipulador exerça uma força constante $f_d = 5$ N no meio. Durante as tarefas T2 e T4 a força desejada varia entre 0 e 10 N, segundo um polinômio de 5ª ordem descrito na sequência.

Para as tarefas T1 e T2 deseja-se que o manipulador seja posicionado em $x_d = 0,40$ m, $y_d = 0,1213$ m. Nas tarefas T3 e T4 deseja-se que o manipulador mantenha a posição $x_d = 0,40$ m, deslocando-se entre $y_d = 0,1213$ m e $y_d = 0,3213$ m, segundo um polinômio de 5ª ordem descrito na sequência.

As tarefas possuem duração de 6 s. Quando houver variações de força ou de posição, o valor máximo é atingido em 3 s, devendo este retornar ao valor inicial no decorrer do movimento.

5.2.2 Caso 2: Plano Inclinado

O plano inclinado no qual o manipulador executa as tarefas, mostrado na Fig. 5.2, passa pelo ponto $x = 0,40$ m e $y = -0,20$ m e sua inclinação é de 60° em relação ao eixo y do sistema de coordenadas da base do manipulador.

Durante as tarefas T1 e T3 deseja-se que o manipulador exerça uma força constante $f_{rd} = 5$ N no meio. Durante as tarefas T2 e T4 a força desejada varia entre 0 e 10 N, segundo um polinômio de 5ª ordem descrito na sequência.

Para as tarefas T1 e T2 deseja-se que o manipulador seja posicionado na superfície do plano à 0,35 m de sua borda inferior ($y_{rd} = 0,35$ m). Nas tarefas T3 e T4 deseja-se que o manipulador desloque-se pela superfície do plano inclinado desde o ponto situado à 0,35 m ($y_{rd} = 0,35$ m) da borda inferior do plano inclinado, até o ponto situado à 0,55 m ($y_{rd} = 0,55$ m) da mesma borda, segundo um polinômio de 5ª ordem descrito na sequência.

As tarefas possuem duração de 6 s. Quando houver variações de força ou de posição, o valor máximo é atingido em 3 s, devendo este retornar ao valor inicial no decorrer do movimento.

5.2.3 Caso 3: Superfície Curva

A superfície curva na qual o manipulador executa as tarefas, mostrada na Fig. 5.3, possui centro na origem do sistema de coordenadas da base do manipulador e raio de 0,95 m.

Durante as tarefas T1 e T3 deseja-se que o manipulador exerça uma força constante $f_{rd} = 5$ N no meio. Durante as tarefas T2 e T4 a força desejada varia entre 0 e 10 N, segundo um polinômio de 5ª ordem descrito na sequência.

Para as tarefas T1 e T2 deseja-se que o manipulador seja posicionado na superfície do meio no ponto $y_d = -0,30$ m. Nas tarefas T3 e T4 deseja-se que o

manipulador descreva a curva para os pontos entre $-0,30 \text{ m} < y_d < 0,30 \text{ m}$, segundo um polinômio de 5ª ordem descrito na sequência.

As tarefas possuem duração de 12 s. Quando houver variações de força ou de posição, o valor máximo é atingido em 6 s, devendo este retornar ao valor inicial no decorrer do movimento.

5.3 DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO MANIPULADOR UTILIZADO NA REALIZAÇÃO DAS TAREFAS

O manipulador utilizado é o Puma 560, mostrado na Fig. 5.4, no qual apenas os elos do antebraço e do braço se movimentam, os demais elos estão travados. A flexibilidade nas transmissões e a dinâmica elétrica do motor são desprezadas. Os parâmetros para este modelo dinâmico rígido com dois graus de liberdade foram obtidos de Guenther, 1995.

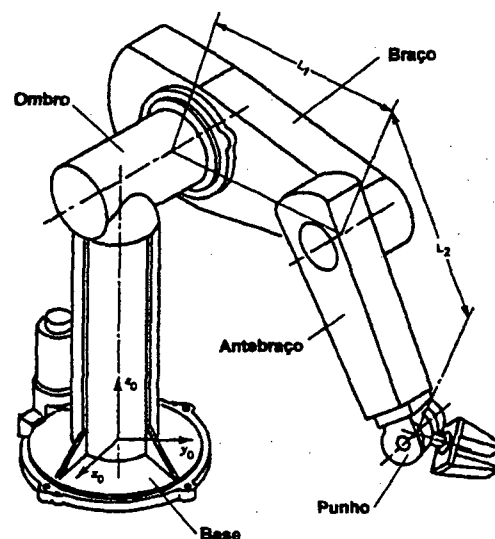


Figura 5.4 - Puma 560

O modelo dinâmico do manipulador no espaço das juntas é dado pela expressão (2.10)

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + J^T f$$

que, para um manipulador com 2 graus de liberdade, é escrito da seguinte forma

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} -\dot{q}_2 & -(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

onde

$$M_{11} = a_1 + 2a_2c_2 + (p_1 + 2p_2c_2)a_9 \quad (5.2)$$

$$M_{12} = M_{21} = a_3 + a_2c_2 + (p_1 + p_2c_2)a_9 \quad (5.3)$$

$$M_{22} = a_7 + p_3a_9 \quad (5.4)$$

$$C = (a_2 + p_2a_9)s_2 \quad (5.5)$$

$$G_1 = a_5c_1 + a_6c_{12} + (p_4c_1 + p_5c_{12})a_9 + a_6 \quad (5.6)$$

$$G_2 = a_6c_{12} + p_5c_{12}a_9 \quad (5.7)$$

com, os parâmetros dados por

$$a_1=6,33, a_2=0,14, a_3=0,11, a_5=31,9, a_6=3,30, a_7=0,94, a_9=1,25, p_1=0,37, p_2=0,18,$$

$p_3=0,18, p_4=4,23, p_5=4,15$. Nas expressões acima é empregada a seguinte notação

$$c_i = \cos(q_i), c_{ij} = \cos(q_i + q_j), s_i = \sin(q_i), s_{ij} = \sin(q_i + q_j).$$

Os elementos J_{ij} do Jacobiano geométrico do manipulador são calculados na sequência.

5.4 SENSORES DE FORÇA E POSIÇÃO

5.4.1 Sensor de Força

A medida da força de interação entre o manipulador e o meio é feita através de um sensor de força montado na extremidade do efetuador final. Neste exemplo, considera-se que o sensor está ligado rigidamente ao elo 2.

Em geral, as forças medidas pelo sensor de força não estão no sistema de coordenadas no qual o controle é feito. É necessário então, que se faça uma transformação de coordenadas para a força, do sistema de coordenadas do sensor para o sistema de coordenadas na qual o controlador está implementado.

Neste exemplo admite-se que a rigidez do sensor é muito maior que a rigidez do meio e do manipulador. Admite-se ainda que a dinâmica do sensor é, muito mais rápida que a dinâmica do manipulador e do meio, fato pelo qual a dinâmica do sensor não é modelada.

5.4.1.1 Força no efetuador final em função da força medida

Sejam os sistemas de coordenadas operacional O - xy e o do sensor O_s - $x_s y_s$

mostrados na Fig. 5.5

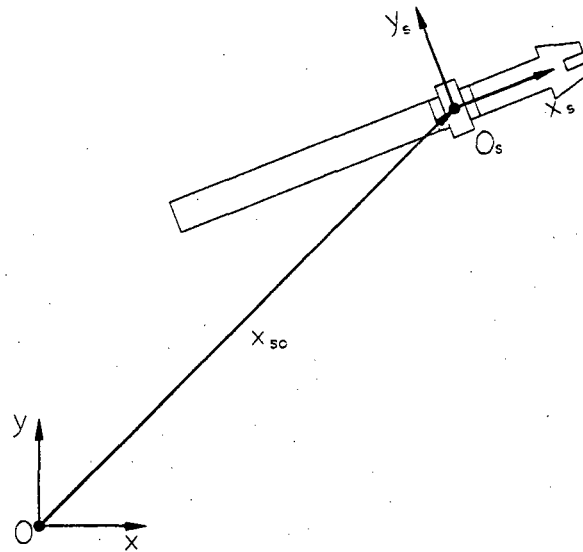


Figura 5.5 - Sistemas de coordenadas operacional e do sensor.

Seja x_{so} o vetor posição da origem O_s em relação ao sistema operacional O - xy . Seja R_s^o a matriz de rotação do sistema do sensor em relação ao sistema operacional.

A transformação de coordenadas do sistema operacional para o sistema do sensor é (veja Asada e Slotine, 1986, por exemplo)

$$x_s = -[R_s^o]^T x_{so} + [R_s^o]^T x \quad (5.8)$$

onde x é o vetor de coordenadas no sistema operacional O - xy e x_s é o vetor de coordenadas do sensor O_s - x_sy_s .

O Jacobiano J_s^o entre o sistema de coordenadas do sensor e o sistema operacional é calculado de (2.28) empregando (5.8), resultando

$$J_s = [R_s^o]^T \quad (5.9)$$

onde R_s^o é a matriz de rotação do sistema de coordenadas do sensor em relação ao operacional.

Desta forma a força no efetuador, calculada usando (2.29) é

$$f = R_s^o f_m \quad (5.10)$$

A força no sistema de coordenadas da tarefa f_r é calculada de forma semelhante. Considere a Fig. 5.6.

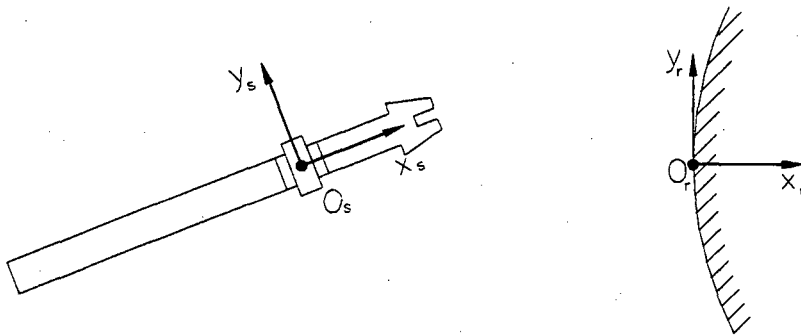


Figura 5.6 - Os sistemas de coordenadas da tarefa e do sensor.

Seja R_s^r a matriz de rotação do sistema do sensor em relação ao da tarefa.

De forma semelhante à utilizada na obtenção da expressão (5.10), calcula-se a força no sistema de coordenadas da tarefa através de

$$f_r = R_s^r f_m \quad (5.11)$$

onde a matriz R_s^r pode ser calculada por

$$R_s^r = R_o^r R_s^o = [R_r^o]^T R_s^o \quad (5.12)$$

sendo R_r^o a matriz de rotação do sistema da tarefa em relação ao sistema operacional.

5.4.2 Sensor de Posição

A posição em que o efetuador final do manipulador encontra-se é determinada através da leitura da posição das juntas do manipulador. Com a posição das juntas é possível determinar-se a posição do efetuador final, através da cinemática direta do manipulador.

5.5 DETERMINAÇÃO DOS SISTEMAS DE COORDENADAS OPERACIONAL, DO SENSOR E DA TAREFA

5.5.1 Sistema de Coordenadas Operacional

Adotou-se como o sistema de coordenadas operacional o sistema de coordenadas da base do manipulador, por este ser um sistema de coordenadas com localização e orientação bem definidas.

5.5.2 Sistema de Coordenadas do Sensor

Como o sensor de força está fixado à extremidade do elo 2, adotou-se sua origem na extremidade deste elo. Os eixos do sistema de coordenadas do sensor estão dispostos conforme mostra a Fig. 5.5.

5.5.3 Sistema de coordenadas da tarefa.

A origem e orientação do sistema de coordenadas da tarefa são definidas de acordo com as características geométricas do meio, no local onde a tarefa será executada, levando-se em consideração as condições fixadas anteriormente na definição do sistema de coordenadas da tarefa, ver capítulo 1.4. Por esta razão se definirá para cada um dos três casos o sistema de coordenadas da tarefa.

5.5.1 Caso 1: Plano Vertical

Para este meio adotou-se como origem do sistema de coordenadas da tarefa, o ponto $x = 0,4$ m e $y = -0,2$ m. A escolha da origem do sistema de coordenadas da tarefa, deve ser tal que este seja um ponto com localização perfeitamente conhecida no espaço. Este ponto pode ser por exemplo, uma referência de posição com a qual o meio irá entrar em contato. A orientação do sistema de coordenadas é feita de maneira a ter-se o controle de força na direção

normal ao plano e o controle de posição na direção tangente a este. Portanto o eixo x_r (controle de força) do sistema de coordenadas da tarefa está na direção normal ao plano, e o eixo y_r (controle de posição) está na direção tangencial ao plano da tarefa. Na Fig. 5.1 pode-se ver a localização dos dois sistemas de coordenadas, o operacional (x,y) e o da tarefa (x_r, y_r) . Observe que a origem do sistema poderia estar em qualquer ponto do espaço operacional, contudo a direção dos eixos não pode ser alterada.

5.5.2 Caso 2: Plano Inclinado

Neste meio adotou-se como origem do sistema de coordenadas da tarefa, o mesmo ponto adotado para o plano vertical, $x = 0,4$ m e $y = -0,2$ m. A orientação, entretanto, é diferente do caso anterior. Neste caso é necessário que haja uma rotação no sentido horário de 60° em torno do eixo z para que as condições para o controle de força e posição sejam satisfeitas. Na Fig. 5.2 pode-se observar a localização dos dois sistemas.

5.5.3 Meio 3: Superfície Curva

Para este caso se adotará como origem do sistema de coordenadas da tarefa a mesma origem do sistema de coordenadas operacional, pelo fato do centro da curva estar sobre este ponto, facilitando a descrição da curva no espaço da tarefa.

Para que as condições do sistema de coordenadas da tarefa sejam satisfeitas é necessário que a orientação deste mude a cada instante no tempo, dependendo da posição onde deseja-se aplicar a força. A rotação do sistema de coordenadas da tarefa será calculada a cada instante, através de um cálculo trigonométrico simples, uma vez que se conhece o raio e a posição x ou y desejada. Na Fig. 5.3 pode-se observar esta configuração.

5.6 TRANSFORMAÇÕES DE COORDENADAS ENTRE O ESPAÇO OPERACIONAL E O DA TAREFA

Os valores desejados para a realização das tarefa devem ser no espaço em que o controlador está implementado. Entretanto, estes valores nem sempre são dados diretamente no espaço do controlador. Torna-se necessário então uma conversão destes valores, dados no espaço operacional ou então no espaço da tarefa, para o espaço no qual o controlador é implementado. A relação entre as coordenadas no espaço operacional e o da tarefa é determinado escrevendo-se as coordenadas no espaço da tarefa como uma função do espaço operacional, isto pode ser facilmente obtido através de uma rotação, e se for o caso, uma translação na origem dos sistemas. Nos casos 1 e 2 os valores para o sistema de coordenadas da tarefa podem ser obtidos a partir da seguinte equação

$$x_r = -[R_r^o]^T x_{ro} + [R_r^o]^T x \quad (5.13)$$

onde

$$R_r^o = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix},$$

$$x_{ro} = [0,4 \quad -0,2]^T$$

resultando em

$$\begin{aligned} x_r &= (x - 0,4)\cos(\varphi) + (y + 0,2)\sin(\varphi) \\ y_r &= -(x - 0,4)\sin(\varphi) + (y + 0,2)\cos(\varphi) \end{aligned} \quad (5.14)$$

ou

$$x = [R_r^o] x_r + x_{ro} \quad (5.15)$$

resultando em

$$\begin{aligned} x &= x_r \cos(\varphi) - y_r \sin(\varphi) + 0,4 \\ y &= x_r \sin(\varphi) + y_r \cos(\varphi) - 0,2 \end{aligned} \quad (5.16)$$

onde φ é o valor da rotação do sistema de coordenadas da tarefa em relação ao operacional. Para o caso 1 (plano vertical) $\varphi = 0^\circ$, para o caso 2 (plano Inclinado) $\varphi = -60^\circ$ e para o caso 3 (curva) $\varphi = f(t)$.

Para a força, pode-se usar a relação

$$f = R_r^o f_r \quad (5.17)$$

uma vez que não há atrito com a superfície, ou seja, $f_T = 0$, a relação é dada por

$$\begin{aligned}f_x &= f_r \cos(\varphi) \\f_y &= f_r \sin(\varphi)\end{aligned}\tag{5.18}$$

Através destas relações pode-se estabelecer os valores desejados, em ambos os espaços, para as diferentes tarefas.

5.7 DETERMINAÇÃO DOS VALORES DESEJADOS

A determinação dos valores desejados no espaço da tarefa e no espaço operacional, para a força e para posição serão feitos a partir da relação de coordenadas existente entre estes dois espaços. É necessário ainda, independente do espaço em que está implementado o controlador, definir-se as trajetórias suaves para posição, velocidade e aceleração, isto pode ser conseguido definindo-se polinômio um de 5ª ordem para força e outro para posição, cujos coeficientes são determinados a partir do tempo desejado para a variação dos valores de força e posição, respectivamente (ver Craig, 1986). Com a utilização de polinômios de 5ª ordem, o formato para as trajetórias de posição, velocidade e aceleração são mostradas nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 respectivamente

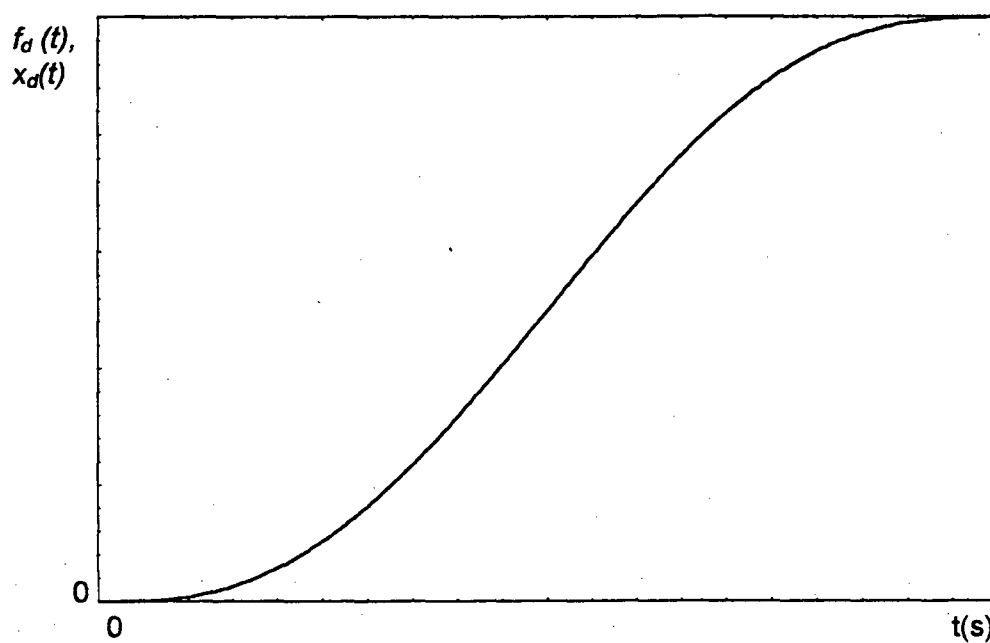


Figura 5.7 - Polinômio de 5ª ordem para a posição

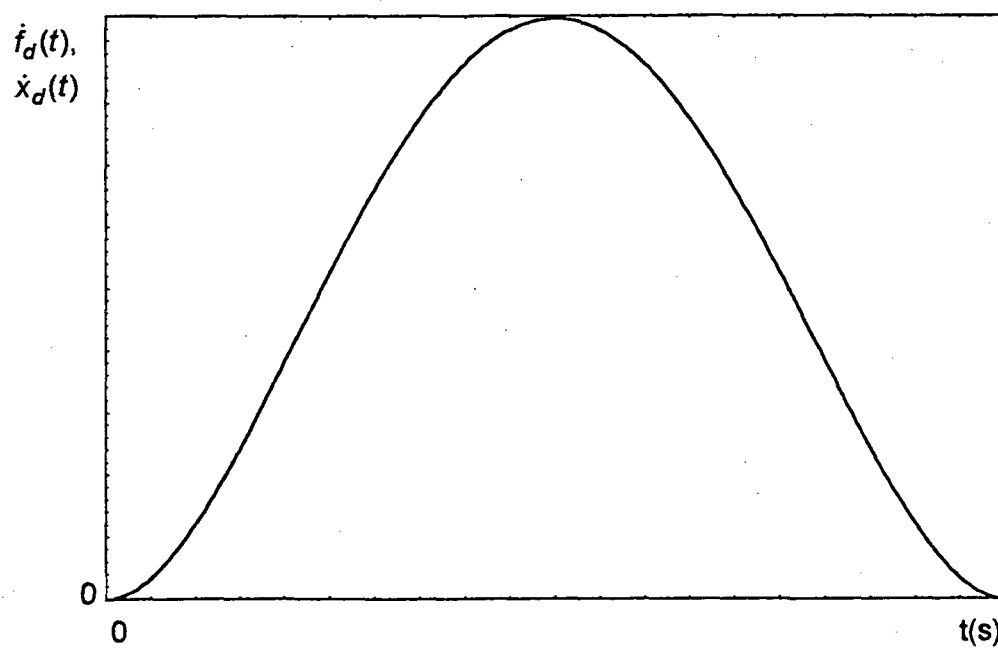


Figura 5.8 - Polinômio de 4ª ordem para a velocidade

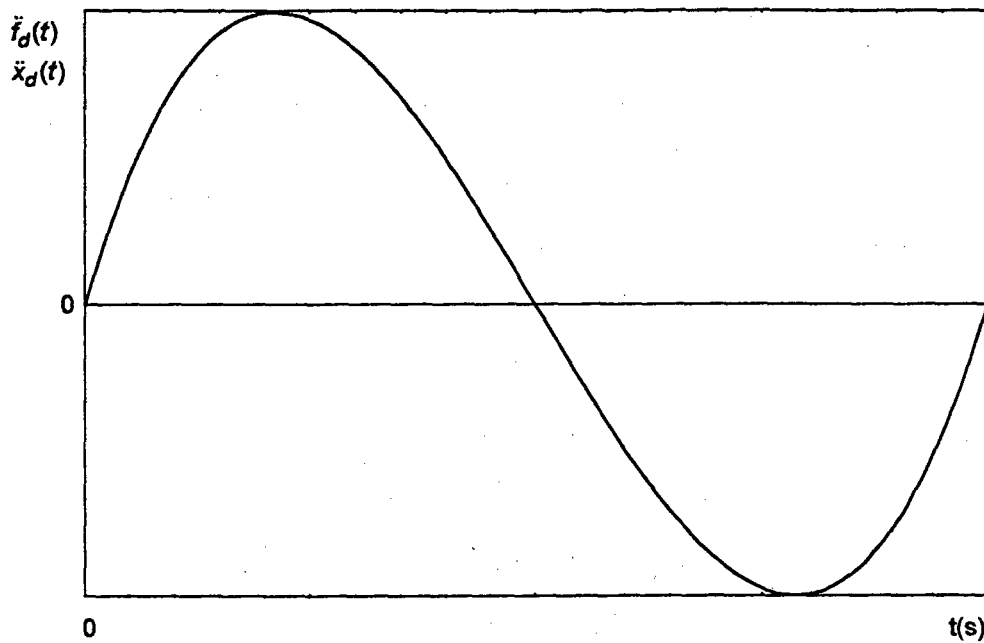


Figura 5.9 - Polinômio de 3ª ordem para a aceleração

5.7.1 Caso 1: Plano Vertical

Neste caso a força e a posição desejada já estão definidas no espaço operacional, ver 5.2.1. É necessário então definir-se os valores para o espaço da tarefa. A origem do sistema de coordenadas da tarefa está distante $x = 0,40$ m e $y = -0,20$ m, da origem do sistema de coordenadas operacionais e o ângulo de rotação entre os sistemas é de $\varphi = 0^\circ$ então, aplicando-se as relações dadas em (5.14) para a posição e (5.18) para a força, obtém-se: para a força nas tarefas T1 e T3, $f_{rd} = 5$ N; e nas tarefas T2 e T4, f_d varia de 0 N à 10 N; para a posição $y_{rd} = 0,3213$ m nas tarefas T1 e T2; e y_{rd} varia entre 0,3213 m e 0,5213 m para as tarefas T3 e T4.

Utilizando-se polinômios de 5ª ordem para as variações tem-se para força nas tarefas T1 e T3

$$f_{rd} = 30t^5 - 75t^4 + 50t^3 \quad \text{para } t \leq 1 \text{ s} \quad \text{e}$$

$$f_{rd} = 5 \quad \text{para } 1 \text{ s} < t < 6 \text{ s}$$

e para as tarefas T2 e T4,

$$f_{rd} = 0.24691t^5 - 18519t^4 + 3.7037t^3 \quad \text{para } 0 \text{ s} < t \leq 3 \text{ s} \quad \text{e}$$

$$f_{rd} = -0.24691(t-3)^5 + 18519(t-3)^4 - 3.7037(t-3)^3 + 10 \quad \text{para } 3 \text{ s} < t < 6 \text{ s}$$

Para posição nas tarefas T1 e T2 tem-se

$$y_{rd} = 0,3213 \text{ m}$$

e nas tarefas T3 e T4,

$$y_{rd} = 4,9383 \times 10^{-3} t^5 - 3,7037 \times 10^{-2} t^4 + 7,4074 \times 10^{-2} t^3 + 0,3213 \quad \text{para } 0 \text{ s} < t \leq 3 \text{ s} \quad \text{e}$$

$$y_{rd} = -4,9383 \times 10^{-3} (t-3)^5 + 3,7037 \times 10^{-2} (t-3)^4 - 7,4074 \times 10^{-2} (t-3)^3 + 0,5213 \quad \text{para } 3 \text{ s} < t < 6 \text{ s}$$

5.7.2 Caso 2: Plano Inclinado

No caso do plano inclinado os valores desejados já estão dados no sistema de coordenadas da tarefa, cabendo então determinar-se os valores desejados para o sistema operacional. Como a origem do sistema de coordenadas da tarefa está distante $x = 0,40$ m e $y = -0,20$ m, da origem do sistema de coordenadas operacionais e o ângulo de rotação entre os sistemas é de $\varphi = -60^\circ$. Aplicando-se as relações dadas em (5.15) para a posição e (5.18) para a força, tem-se os valores para posição e força dadas no espaço operacional. Utilizando-se polinômios de 5ª ordem para as variações tem-se para força nas tarefas T1 e T3 (valores no sistema de coordenadas da tarefa)

$$f_{rd} = 30t^5 - 75t^4 + 50t^3 \quad \text{para } t \leq 1 \text{ s} \quad \text{e}$$

$$f_{rd} = 5 \quad \text{para } 1 \text{ s} < t < 6 \text{ s}$$

e para as tarefas T2 e T4,

$$f_{rd} = 0.24691t^5 - 18519t^4 + 3.7037t^3 \quad \text{para } 0 \text{ s} < t \leq 3 \text{ s} \quad \text{e}$$

$$f_{rd} = -0.24691(t-3)^5 + 18519(t-3)^4 - 3.7037(t-3)^3 + 10 \quad \text{para } 3 \text{ s} < t < 6 \text{ s}$$

Para posição nas tarefas T1 e T2 tem-se

$$y_{rd} = 0,35 \text{ m}$$

e nas tarefas T3 e T4,

$$y_{rd} = 4,9383 \times 10^{-3} t^5 - 3,7037 \times 10^{-2} t^4 + 7,4074 \times 10^{-2} t^3 + 0,35 \quad \text{para } 0 \text{ s} < t \leq 3 \text{ s e}$$

$$y_{rd} = -4,9383 \times 10^{-3} (t-3)^5 + 3,7037 \times 10^{-2} (t-3)^4 - 7,4074 \times 10^{-2} (t-3)^3 + 0,55 \quad \text{para } 3 \text{ s} < t < 6 \text{ s}$$

5.7.3 Caso 3: Superfície Curva

Para a superfície curva os valores desejados no sistema de coordenadas da tarefa, são $f_{rd} = 5 \text{ N}$ nas tarefas T1 e T3; e nas tarefas T2 e T4 f_{rd} varia de 0 N a 10 N. Como o sistema de coordenadas da tarefa está no centro da curva fica fácil determinar-se y_{rd} , uma vez que este corresponde ao ponto de aplicação da força, que é dado pela rotação do sistema de coordenadas da tarefa. Já que a força deve ser aplicada neste ponto então $y_{rd} = 0$

Já para o sistema de coordenadas operacionais é necessário descrever a curva no espaço operacional. Isto pode ser conseguido através da seguinte relação trigonométrica, $x^2 + y^2 = r^2$, portanto estando o raio definido ($r=0,95 \text{ m}$), basta informar y (ou x) que pode-se calcular x (ou y). Para se determinar a força desejada no espaço operacional pode se utilizar a equação (5.15), que transforma o valor da força do sistema de coordenadas da tarefa para o sistema de coordenadas operacional, dada a rotação do sistema de coordenadas da tarefa.

Utilizando-se polinômios de 5ª ordem para as variações tem-se para força nas tarefas T1 e T3 (valores no sistema de coordenadas da tarefa)

$$f_{rd} = 30t^5 - 75t^4 + 50t^3 \quad \text{para } t \leq 1 \text{ s} \quad \text{e}$$

$$f_{rd} = 5 \quad \text{para } 1 \text{ s} < t < 12 \text{ s}$$

e para as tarefas T2 e T4,

$$f_{rd} = 7,716 \times 10^{-3} t^5 - 0,11574 t^4 + 0,46296 t^3 \quad \text{para } 0 \text{ s} < t \leq 6 \text{ s} \quad \text{e}$$

$$f_{rd} = -7,716 \times 10^{-3} (t-6)^5 + 0,11574 (t-6)^4 - 0,46296 (t-6)^3 + 10 \quad \text{para } 6 \text{ s} < t < 12 \text{ s}$$

Para posição nas tarefas T1 e T2 tem-se (valores no sistema de coordenadas operacional),

$$y_d = 0,30 \text{ m}$$

e nas tarefas T3 e T4,

$$y_d = 4,62963 \times 10^{-4} t^5 - 6,94444 \times 10^{-3} t^4 + 2,77778 \times 10^{-2} t^3 - 0,30 \quad \text{para } 0 \text{ s} < t \leq 6 \text{ s} \quad \text{e}$$

$$y_d = -4,62963 \times 10^{-4} (t-6)^5 + 6,94444 \times 10^{-3} (t-6)^4 + 2,77778 \times 10^{-2} (t-6)^3 + 0,30 \quad \text{para}$$

$$6 \text{ s} < t < 12 \text{ s}$$

5.8 DETERMINAÇÃO DOS JACOBIANOS

A obtenção do Jacobiano é feita a partir da descrição geométrica do manipulador num dado espaço. Uma vez que no projeto dos controladores são utilizados dois espaços distintos, dependendo da formulação do controlador, é necessário obter-se o Jacobiano para o espaço operacional e o Jacobiano para o espaço da tarefa.

5.8.1 Determinação do Jacobiano Referente ao Espaço Operacional

Para determinar-se o Jacobiano no espaço operacional é necessário descrever a posição e orientação do efetuador final do manipulador neste espaço como uma função da posição das juntas. Neste caso simples, com dois graus de liberdade, pode-se obter a posição e orientação do efetuador final do manipulador geometricamente a partir da Fig. 5.10,

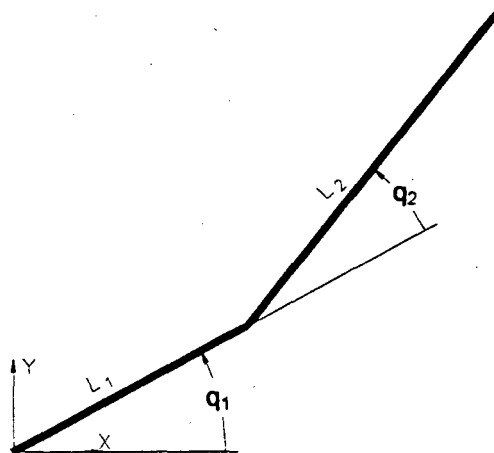


Figura 5.10 - Manipulador com Dois Graus de Liberdade

A posição do efetuador final no espaço operacional é dada por

$$x = L_1 \cos(q_1) + L_2 \cos(q_1 + q_2) \quad (5.19)$$

$$y = L_1 \sin(q_1) + L_2 \sin(q_1 + q_2) \quad (5.20)$$

onde para o Puma 560, $L_1 = 0,4318$ m e $L_2 = 0,6431$ m.

A posição e a orientação do manipulador no eixo coordenado Z são fixas, não dependendo da posição das juntas, razão pela qual não são mostradas.

Definida a posição e orientação do efetuador final como função das juntas, pode-se então obter o Jacobiano do manipulador para o espaço operacional, usando-se a equação (2.4)

$$J_O = \frac{\partial x}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial q_1} & \frac{\partial x}{\partial q_2} \\ \frac{\partial y}{\partial q_1} & \frac{\partial y}{\partial q_2} \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

$$J_O = \begin{bmatrix} -L_1 \sin(q_1) - L_2 \sin(q_1 + q_2) & -L_2 \sin(q_1 + q_2) \\ L_1 \cos(q_1) + L_2 \cos(q_1 + q_2) & L_2 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

5.8.2 Determinação do Jacobiano Referente ao Espaço da Tarefa

O Jacobiano da tarefa é obtido a partir do sistema de coordenadas da tarefa de maneira análoga ao Jacobiano relativo ao espaço operacional. Contudo como uma das tarefas que se pretende executar, envolve o seguimento de uma curva, neste caso particular haverá uma mudança da orientação do sistema de

coordenadas da tarefa à cada ponto da curva, implicando em um novo jacobiano da tarefa para cada ponto da curva. Para possibilitar este cálculo, o sistema de coordenadas da tarefa será descrito através de uma rotação (φ) do sistema operacional, conforme pode-se ver na Fig. 5.3. Escrevendo o sistema de coordenadas no espaço da tarefa como em (5.14), onde os valores das coordenadas x e y são dadas respectivamente pelas equações (5.19) e (5.20), então tem-se

$$\begin{aligned} x_r &= [L_1 \cos(q_1) + L_2 \cos(q_1 + q_2)] \cos(\varphi) + [L_1 \sin(q_1) + L_2 \sin(q_1 + q_2)] \sin(\varphi) \\ y_r &= -[L_1 \cos(q_1) + L_2 \cos(q_1 + q_2)] \sin(\varphi) + [L_1 \sin(q_1) + L_2 \sin(q_1 + q_2)] \cos(\varphi) \end{aligned} \quad (5.23)$$

Com isto, pode-se então obter o Jacobiano da tarefa

$$J_r = \frac{\partial x_r}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_r}{\partial q_1} & \frac{\partial x_r}{\partial q_2} \\ \frac{\partial y_r}{\partial q_1} & \frac{\partial y_r}{\partial q_2} \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

$$J_r = \begin{bmatrix} -L_1 \sin(q_1 - \varphi) - L_2 \sin(q_1 + q_2 - \varphi) & -L_2 \sin(q_1 + q_2 - \varphi) \\ L_1 \cos(q_1 - \varphi) + L_2 \cos(q_1 + q_2 - \varphi) & L_2 \cos(q_1 + q_2 - \varphi) \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

O resultado acima pode ser aplicado aos demais casos, bastando conhecer a rotação φ do sistema de coordenadas da tarefa em relação ao operacional.

5.9 ALGORITIMOS DE CONTROLE DE FORÇA E POSIÇÃO

5.9.1 Controle de Rigidez

O controle de rigidez, conforme visto anteriormente, possui como lei de controle a equação (4.9) dada por

$$\tau = J^T(q)(-K_v\dot{x} + K_p\tilde{x}) + \hat{G}(q)$$

Uma vez que esta lei de controle é realizada no espaço operacional, a equação (4.9) toma a forma

$$\tau = J_o^T \left(- \begin{bmatrix} k_{vx} & 0 \\ 0 & k_{vy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{px} & 0 \\ 0 & k_{py} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \end{bmatrix} \right) + \hat{G}(q) \quad (5.26)$$

onde k_{pm} e k_{vn} são os ganhos proporcionais e derivativos nas direções m e n respectivamente.

5.9.2 Controle de Força e Posição no Espaço Operacional

O vetor de força nas juntas para a lei de controle de força e posição no espaço operacional (equação 4.47), conforme visto anteriormente, é

$$\tau = \hat{M}\hat{J}^{-1}\hat{J}^{-1}\dot{\hat{q}} + \hat{C}\dot{\hat{q}} + \hat{G} + \hat{J}^T \hat{f} + \\ + \hat{M}\hat{J}^{-1} \left[\Omega (\ddot{x}_d - K_{vp}\dot{\tilde{x}} - K_{pp}\tilde{x}) + \overline{\Omega} k_e^{-1} (\ddot{f}_d - K_{vf}\dot{\tilde{f}} - K_{pf}\tilde{f}) \right]$$

É necessário definir-se as matrizes Ω e $\overline{\Omega}$, dadas em (4.40) e (4.41), que são as matrizes que estabelecem as direções de controle de posição e força respectivamente.

5.9.2.1 Matrizes de Seleção de Força e Posição

Através destas matrizes define-se quais as direções terão o controle de força e posição. Isto é feito estabelecendo em qual eixo haverá o controle de força, (para o qual adotou-se o eixo x), e o de posição (eixo y). Feitas estas definições, pode-se então definir as matrizes diagonais Σ_f e $\overline{\Sigma}_f$, então

$$\Sigma_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5.27)$$

significando que o controle de posição é feito sobre o eixo y, e

$$\overline{\Sigma}_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5.28)$$

especificando o controle de força sobre o eixo x.

O passo seguinte é definir a rotação S_r na qual este sistema deve ser rotacionado sobre o eixo Z de maneira a este comportar-se como o sistema de coordenadas da tarefa.

$$S_r = R_o^r = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

então podemos definir as matrizes de seleção, no espaço operacional

$$\Omega = S_f^T \Sigma_f S_f = \begin{bmatrix} \sin^2(\varphi) & -\sin(\varphi)\cos(\varphi) \\ -\sin(\varphi)\cos(\varphi) & \cos^2(\varphi) \end{bmatrix}, \quad (5.30)$$

que representa a matriz de seleção para posição, e

$$\bar{\Omega} = S_f^T \bar{\Sigma}_f S_f = \begin{bmatrix} \cos^2(\varphi) & \sin(\varphi)\cos(\varphi) \\ \sin(\varphi)\cos(\varphi) & \sin^2(\varphi) \end{bmatrix}, \quad (5.31)$$

que representa a matriz de seleção para força.

5.9.2.2 Leis de Controle para a força e a posição

As leis de controle para a posição (a_p) e para a força (a_f) estão baseadas no uso dos controladores tipo PD mostrados nas equações (5.32) e (5.33).

$$a_p = \begin{bmatrix} \ddot{x}_d \\ \ddot{y}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{dpx} & 0 \\ 0 & k_{dpy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_d - \dot{x} \\ \dot{y}_d - \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{ppx} & 0 \\ 0 & k_{ppy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

$$a_f = \begin{bmatrix} \ddot{f}_{xd} \\ \ddot{f}_{yd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{dfx} & 0 \\ 0 & k_{dfy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{f}_{xd} - \dot{f}_x \\ \dot{f}_{yd} - \dot{f}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{pfx} & 0 \\ 0 & k_{pfy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{xd} - f_x \\ f_{yd} - f_y \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

onde k_{ppi} e k_{pfi} são os ganhos proporcionais na direção i e k_{dpi} e k_{dfi} são os ganhos derivativos na direção i . A escolha dos ganhos e dos valores desejados, devem ser feitos de acordo com a tarefa a ser realizada.

5.9.3 Controle Híbrido de Força e Posição

O controle híbrido de força e posição é feito no sistema de coordenadas da tarefa, através do uso de matrizes de seleção. O vetor de força nas juntas para a lei de controle híbrido de força e posição, conforme visto anteriormente, é dado pela equação (4.21)

$$\tau = \hat{M}(q)\hat{J}_r^{-1}(q)\left(a_r + \hat{J}_r^{-1}(q)\dot{q}\right) + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}(q) + \hat{J}_r^T(q)\hat{f}_r$$

onde, a lei de controle de força e posição a_r é dada por

$$a_r = \Omega a_{rp} + \overline{\Omega} a_{rf} \quad (5.34)$$

portanto torna-se necessário estabelecer Ω , $\overline{\Omega}$, a_{rp} e a_{rf} .

5.9.3.1 Matrizes de Seleção

Como deseja-se controlar a força na direção x_r e a posição na direção y_r então, definindo-se a matriz de seleção para posição como sendo

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

e, a matriz de seleção para força

$$\bar{\Omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

5.9.3.2 Leis de controle

Adotou-se controladores tipo PD tanto para força quanto para posição, pois demonstrou-se anteriormente que este tipo de controle elimina o erro de regime. Portanto

$$a_{rp} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{rd} \\ \ddot{y}_{rd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{dx} & 0 \\ 0 & k_{dy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{rd} - \dot{x}_r \\ \dot{y}_{rd} - \dot{y}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{px} & 0 \\ 0 & k_{py} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{rd} - x_r \\ y_{rd} - y_r \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

e

$$a_{rf} = \begin{bmatrix} \ddot{f}_{rxd} \\ \ddot{f}_{ryd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{fdx} & 0 \\ 0 & k_{fdy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{f}_{rxd} - \dot{f}_{rx} \\ \dot{f}_{ryd} - \dot{f}_{ry} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{fpx} & 0 \\ 0 & k_{fpy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{rxd} - f_{rx} \\ f_{ryd} - f_{ry} \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

Com isto, lei de controle a_r é

$$a_r = \begin{bmatrix} \ddot{f}_{rxd} + k_{fdx}(\dot{f}_{rxd} - \dot{f}_{rx}) + k_{fpx}(f_{rxd} - f_{rx}) \\ \ddot{y}_{rd} + k_{dxy}(\dot{y}_{rd} - \dot{y}_r) + k_{pdx}(y_{rd} - y_r) \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

que substituído na expressão (4.21), resulta no torque de controle.

Novamente os ganhos de força e posição serão escolhidos de acordo com a tarefa.

5.9.4 Controle Paralelo

O controle paralelo tem como característica principal, a inexistência de matrizes de seleção para força e posição. A sua estrutura de controle é composta por dois controladores agindo em paralelo, sendo um PI para a força e um PD para a posição. O vetor de controle é dado pelas equações (4.52) e (4.53), portanto

$$a = \begin{bmatrix} \ddot{x}_d \\ \ddot{y}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{dx} & 0 \\ 0 & k_{dy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_d - \dot{x} \\ \dot{y}_d - \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{px} & 0 \\ 0 & k_{py} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{fx} & 0 \\ 0 & k_{fy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{xd} - f_x \\ f_{yd} - f_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{ix} & 0 \\ 0 & k_{iy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int (f_{xd} - f_x) df \\ \int (f_{yd} - f_y) df \end{bmatrix} \quad (5.40)$$

$$a = \begin{bmatrix} \ddot{x}_d + k_{dx}(\dot{x}_d - \dot{x}) + k_{px}(x_d - x) + k_{fx}(f_{xd} - f_x) + k_{ix} \int (f_{xd} - f_x) df \\ \ddot{y}_d + k_{dy}(\dot{y}_d - \dot{y}) + k_{py}(y_d - y) + k_{fy}(f_{yd} - f_y) + k_{iy} \int (f_{yd} - f_y) df \end{bmatrix} \quad (5.41)$$

Os ganhos e valores desejados devem ser escolhidos de acordo com a tarefa desejada.

5.10 Determinação dos Ganhos para a Realização das Tarefas

A determinação dos ganhos relativo aos controladores é estabelecido através do comportamento desejado ao sistema. Deseja-se que a força exercida pelo manipulador no meio não exceda ao valor desejado e que os erros de força e posição sejam pequenos. Deseja-se ainda que o tempo de assentamento (t_s) seja menor que 1 s e que o amortecimento (ζ) do sistema seja aproximadamente 0,7.

A partir do tempo de assentamento e do amortecimento desejado para o sistema, pode-se determinar para os controladores que são governados por uma dinâmica de segunda ordem, tais como o controle híbrido e o operacional, os valores de K_p e K_d para a força através das expressões (5.42) e (5.43) (Franklin et al., 1996).

$$K_p = \left(\frac{4,6}{t_s^2} \right) \quad (5.42)$$

e

$$K_d = \frac{9,2}{t_s} \quad (5.43)$$

resultando em $K_p = 43,18$ e $K_d = 9,2$. Estes valores de ganhos são adotados para força nas direções X e Y do controle operacional e para o controle híbrido no espaço da tarefa.

Para o controle de rigidez, adotou-se o valor de $K_p = 4318.37$ e $K_d = 92$. Com a escolha destes ganhos, o comportamento do sistema deverá ser semelhante ao de um sistema de segunda ordem. A diferença esperada no comportamento deste sistema, deve-se ao fato do controle de rigidez não fazer um desacoplamento completo do sistema, apenas são compensados os torques gravitacionais, e nas diferenças relativas ao próprio controlador.

No controle paralelo adotou-se os ganhos de $K_i = 0.05$ e $K_p = 0.01$, a escolha destes ganhos foi realizada a partir de simulações, uma vez que existe um acoplamento entre o controle de força e o controle de posição no controle paralelo. O tempo de assentamento para este controlador é superior ao desejado, isto porque para um tempo menor, existe um sobre-passo na força muito elevado.

Os ganhos para o controle de posição, para os controladores (exceto o de rigidez), são $K_p = 500$ e $K_d = 45$.

CAPITULO 6

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

De uma maneira geral, todos os controladores responderam de forma esperada as diversas situações a que foram submetidos. Para todos os diferentes meios, pode-se observar que quanto maior o movimento do manipulador, maior o erro de força, embora o erro de posição seja praticamente ou mesmo nulo. Os torques de controle, em tarefas iguais, para os diferentes controladores, são praticamente os mesmos.

6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

As principais diferenças observadas no desempenho dos controladores, durante a realização das tarefas são os valores numéricos, para o erro de força e para o erro de posição no espaço onde o controlador está implementado.

Nas tarefas executadas, os ganhos utilizados foram os ganhos projetados no capítulo anterior, item 5.10.

Na sequência, é feita uma análise de cada controlador no desempenho das diversas tarefas.

6.1.1 Controle de Rigidez

As figuras 6.1 a 6.4 mostram os resultados das simulações para o controle de rigidez para as tarefas 1 a 4 respectivamente, para o plano vertical (caso 1). Pode-se observar nestas figuras que o erro de força é relativamente alto. Isto é porque a lei de controle (4.9) não inclui a compensação dos torques inerciais, centrífugos e de Coriolis nem os relativos a força que o meio exerce no manipulador como nos demais controladores, além de não incluir também os termos de aceleração e velocidade desejadas o que contribui para aumentar os erros tanto de força quanto de posição. Alterando esta lei de controle para

$$\tau = \hat{M}(q)\hat{J}^{-1}(q)\left(a - \hat{J}(q)\dot{q}\right) + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}(q) \quad (6.1)$$

onde $\hat{M}(q)$, $\hat{C}(q)$, $\hat{G}(q)$ são os valores estimados para $M(q)$, $C(q)$, $G(q)$, respectivamente (obtidos em Guenther, 1995), \hat{J} é o valor estimado do Jacobiano e o vetor de controle a é dado por

$$a = \ddot{x}_d + K_v(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_p(x_d - x) \quad (6.2)$$

os erros de força e posição diminuem significativamente, como pode ser observado na Fig. 6.5 que mostra o resultado da simulação para a lei de controle (6.1) com o manipulador realizando a tarefa 4.

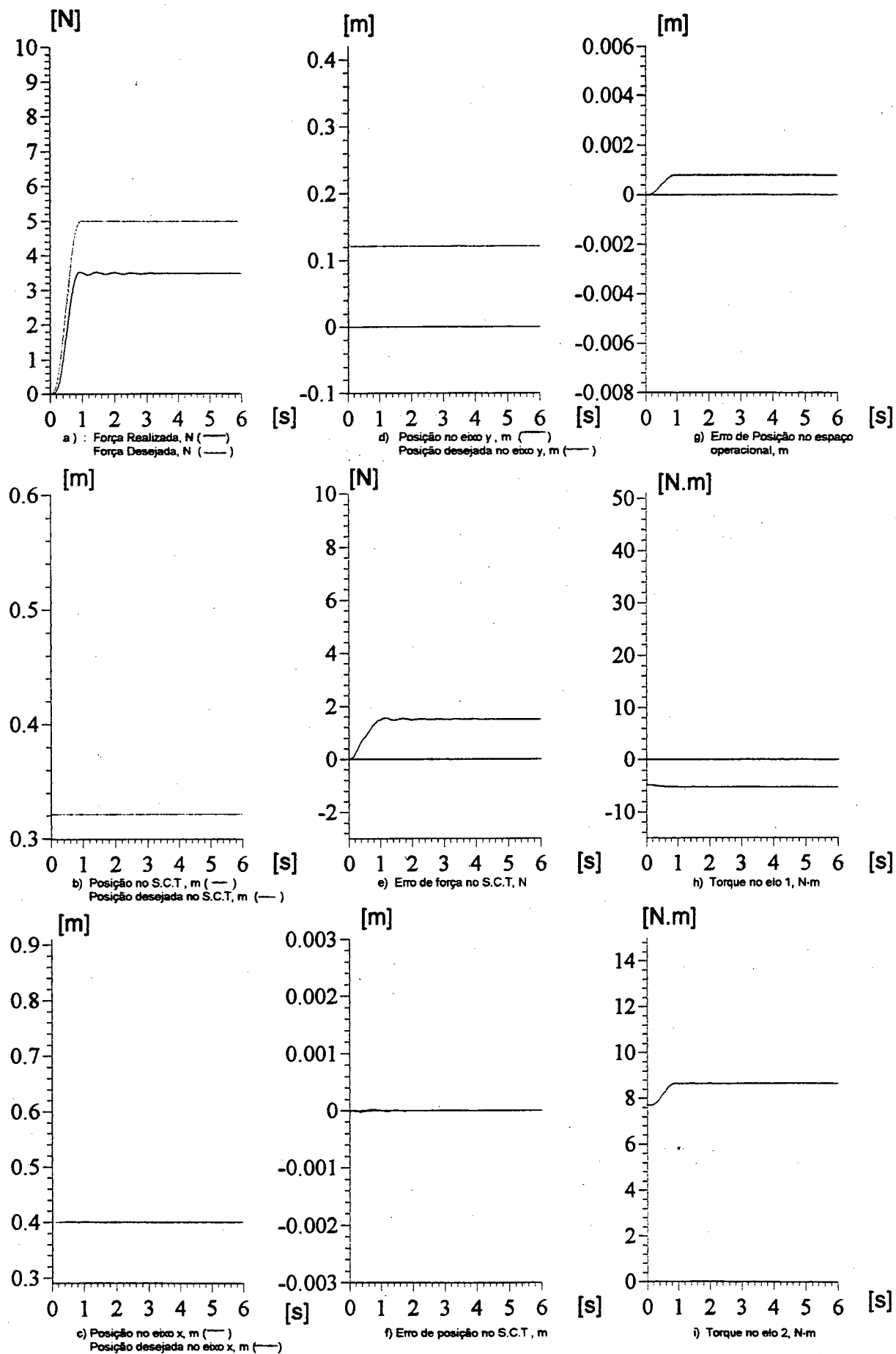


FIGURA 6.1 - CONTROLADOR: RIGIDEZ
CASO 1 - PLANO VERTICAL
TAREFA:1

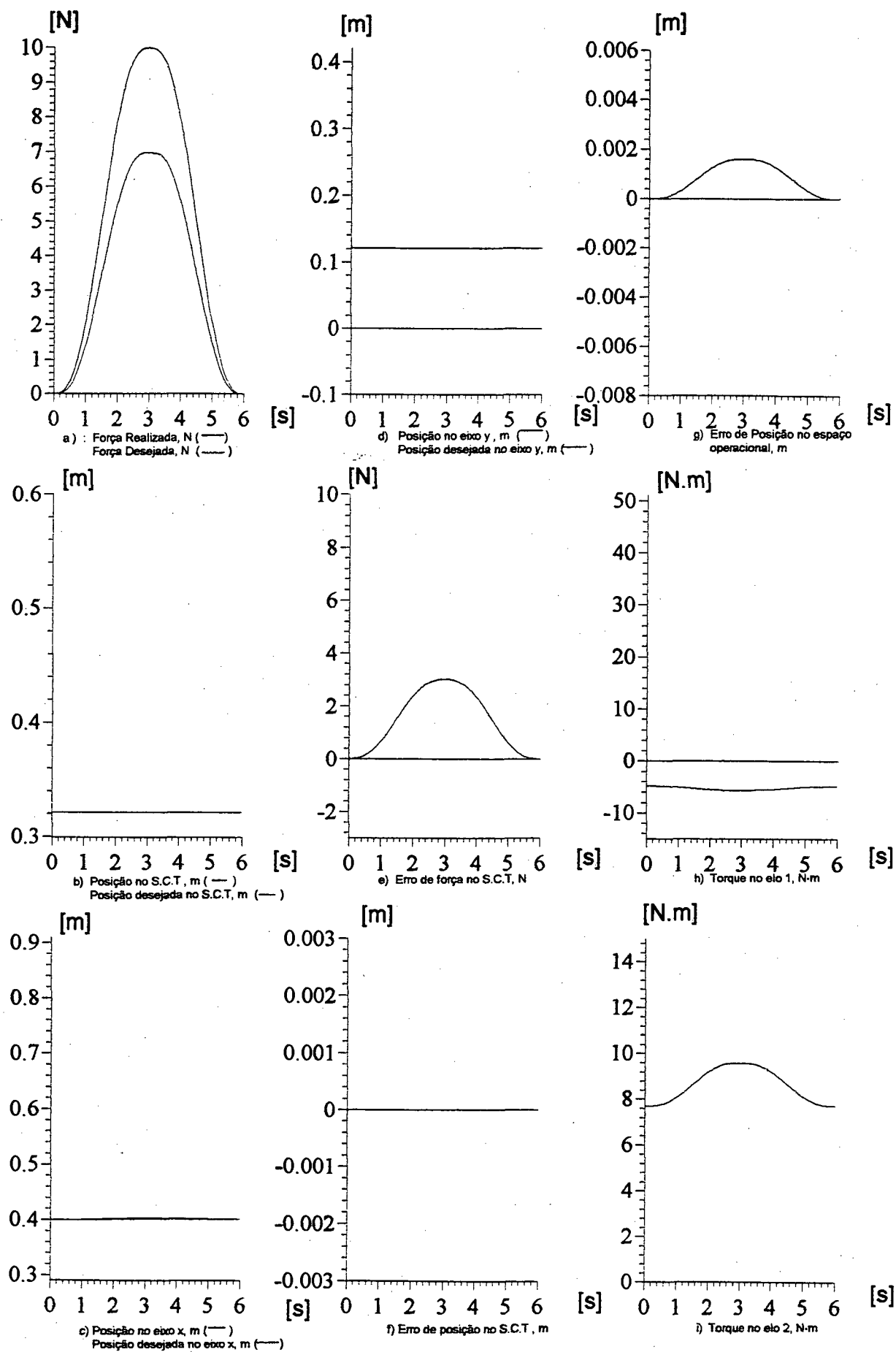


FIGURA 6.2 - CONTROLADOR: RIGIDEZ
CASO 1 - PLANO VERTICAL
TAREFA:2

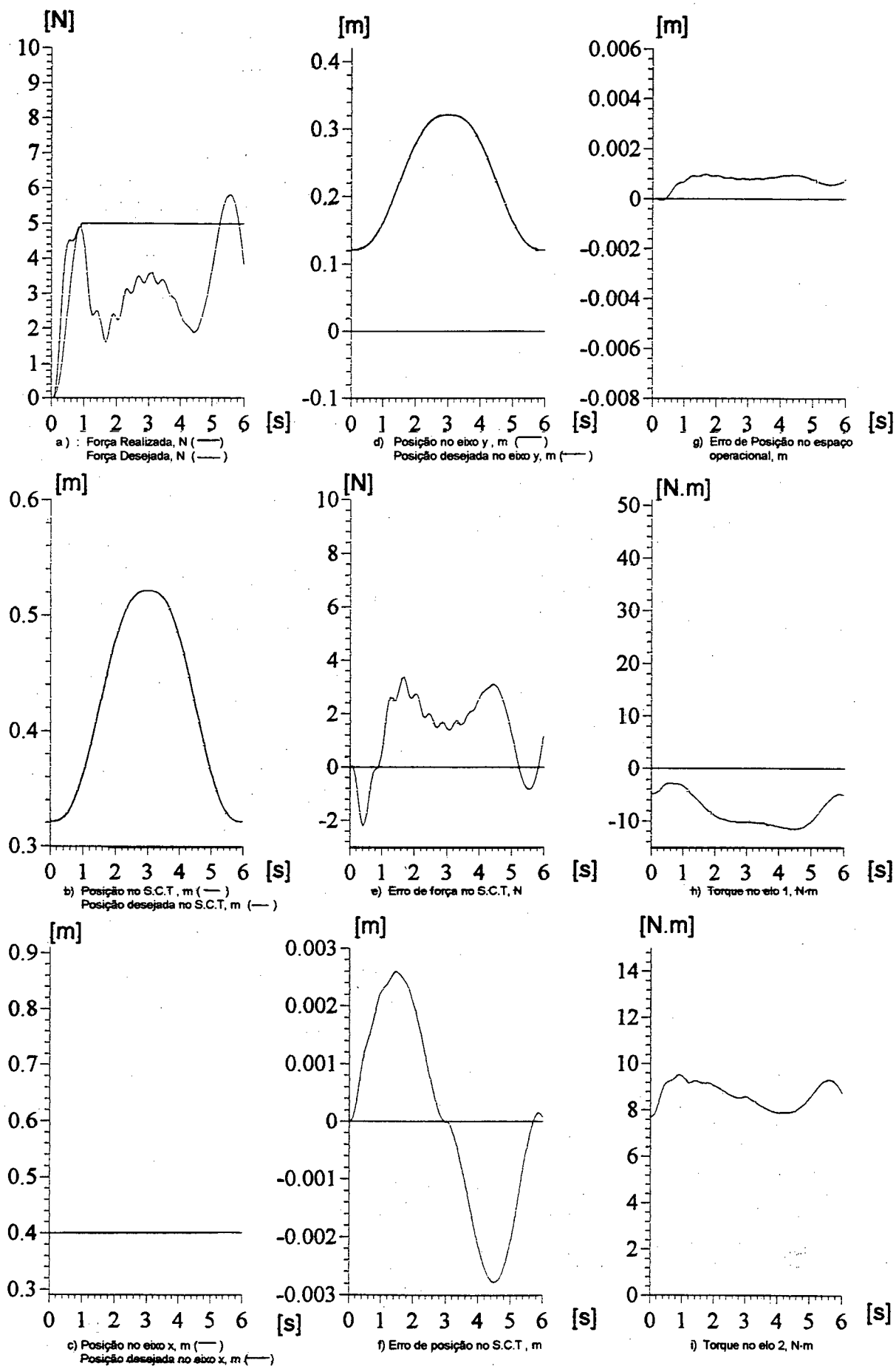


FIGURA 6.3 - CONTROLADOR: RIGIDEZ
CASO 1 - PLANO VERTICAL
TAREFA:3

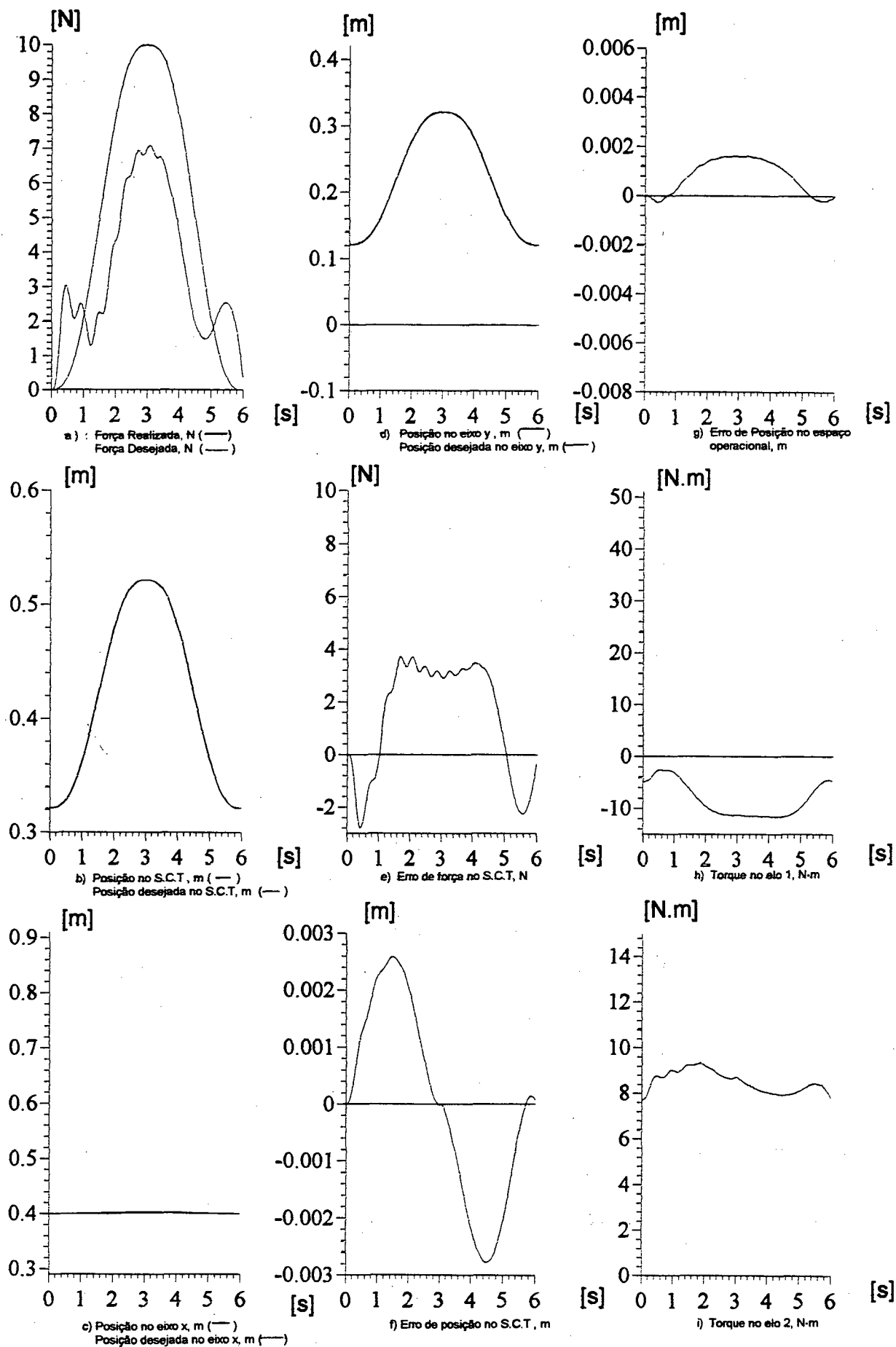


FIGURA 6.4 - CONTROLADOR: RIGIDEZ
CASO 1 - PLANO VERTICAL
TAREFA:4

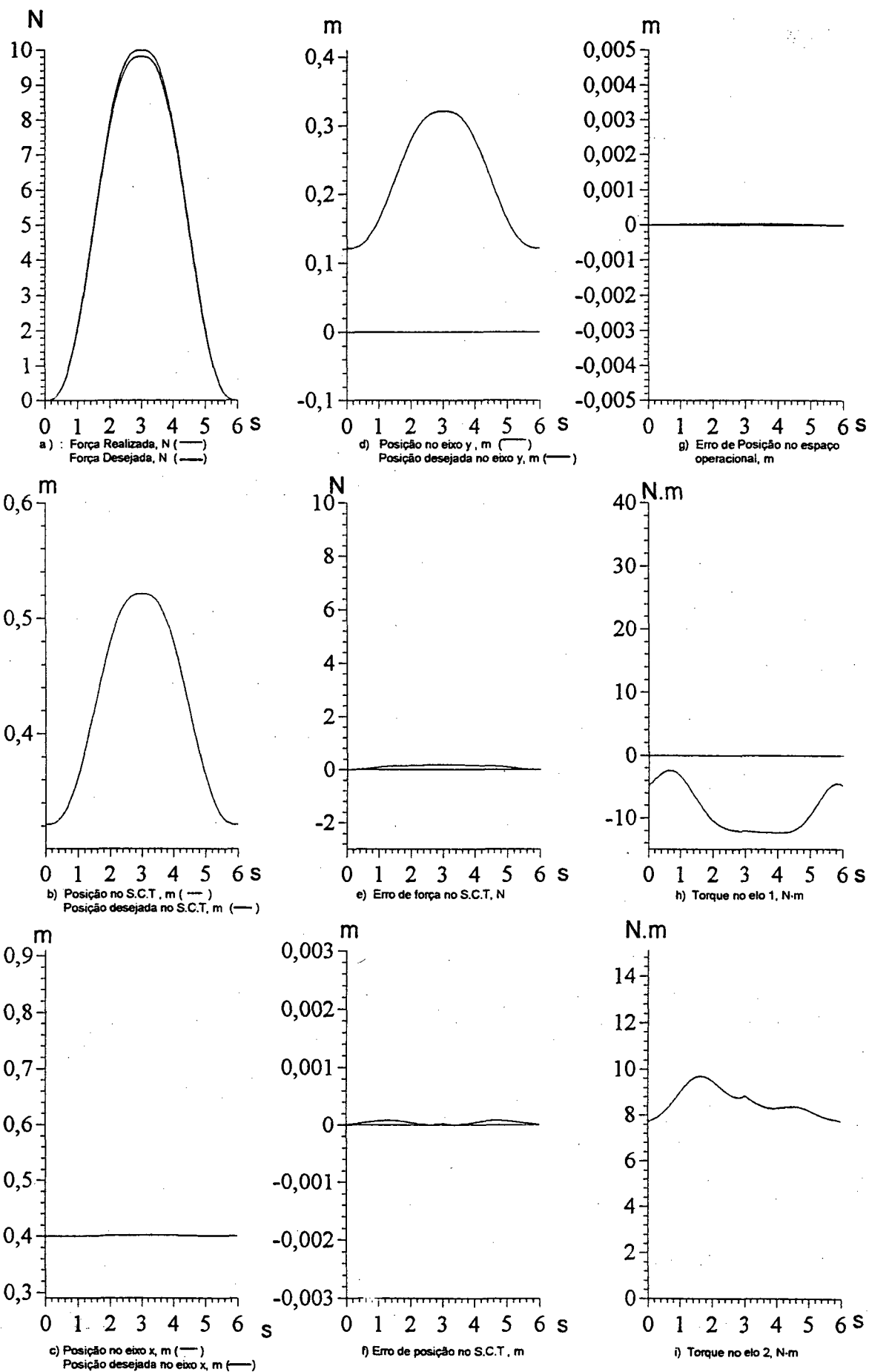


FIGURA 6.5 - CONTROLADOR: RIGIDEZ COM ALGORÍTIMO MODIFICADO
CASO 1 - PLANO VERTICAL
TAREFA: 4

As figuras 6.6 a 6.9 mostram os resultados das simulações para o controle de rigidez para as tarefas 1 a 4 respectivamente, para o plano inclinado (caso 2). Pode-se observar nestas figuras que os erro de força e posição mostram-se muito semelhantes aos da tarefa 1, pelos mesmos motivos. Aplicado-se a lei de controle (6.1) o controlador apresenta os resultados mostrados na fig. 6.10, para a tarefa 4. Novamente aqui os erros são reduzidos.

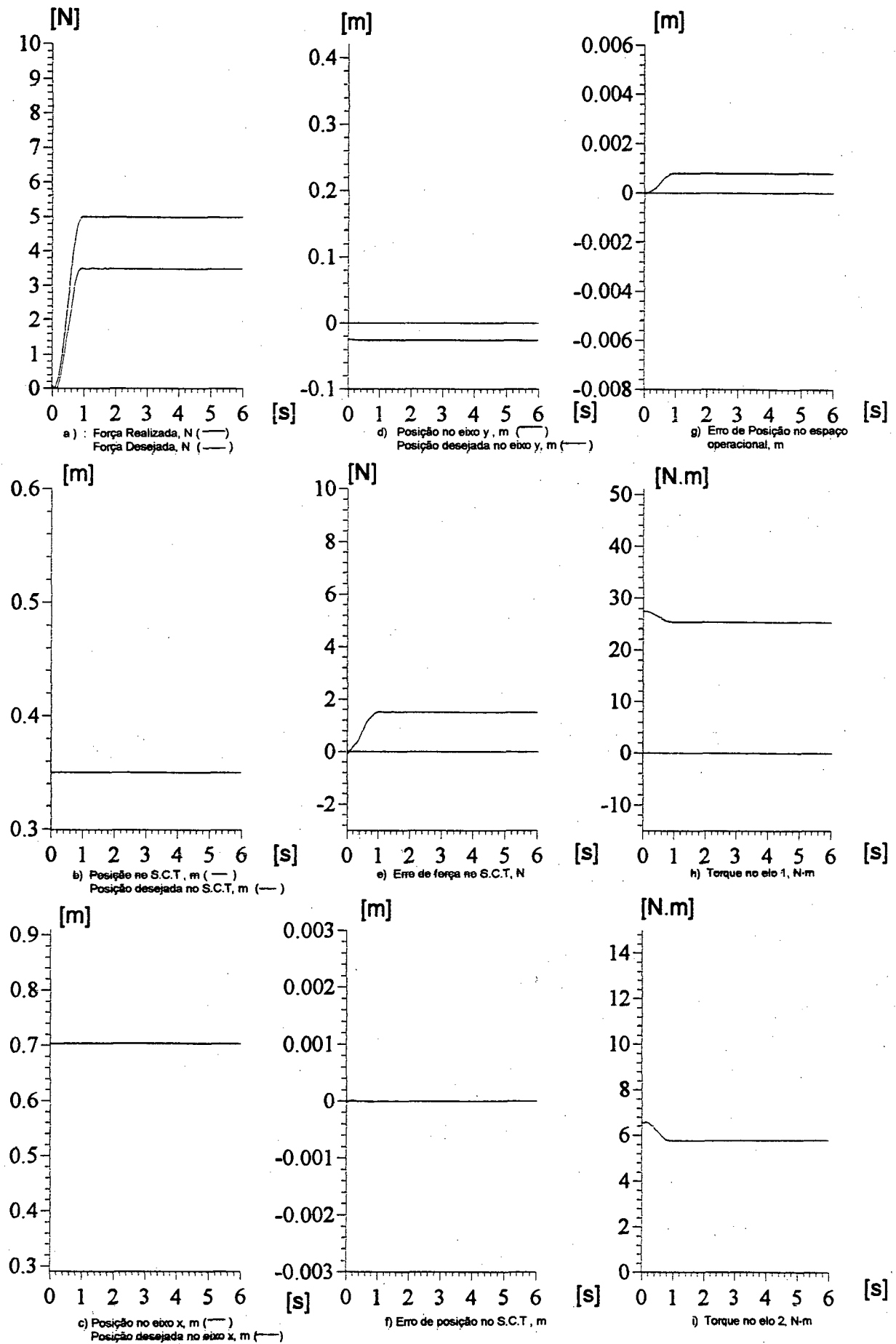


FIGURA 6.6 - CONTROLADOR: RIGIDEZ
CASO 2 - PLANO INCLINADO
TAREFA:1

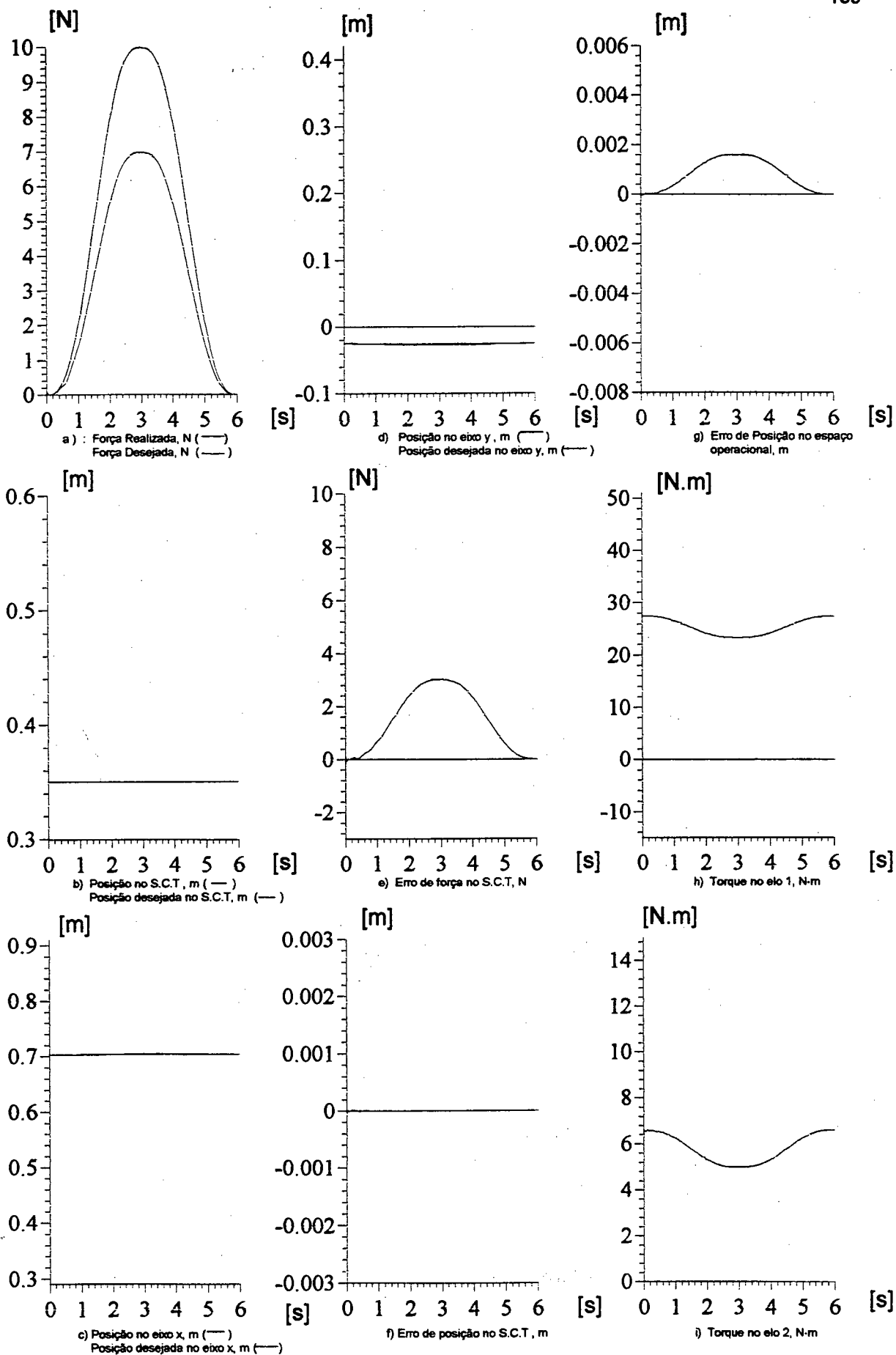


FIGURA 6.7 - CONTROLADOR: RIGIDEZ
CASO 2 - PLANO INCLINADO
TAREFA:2

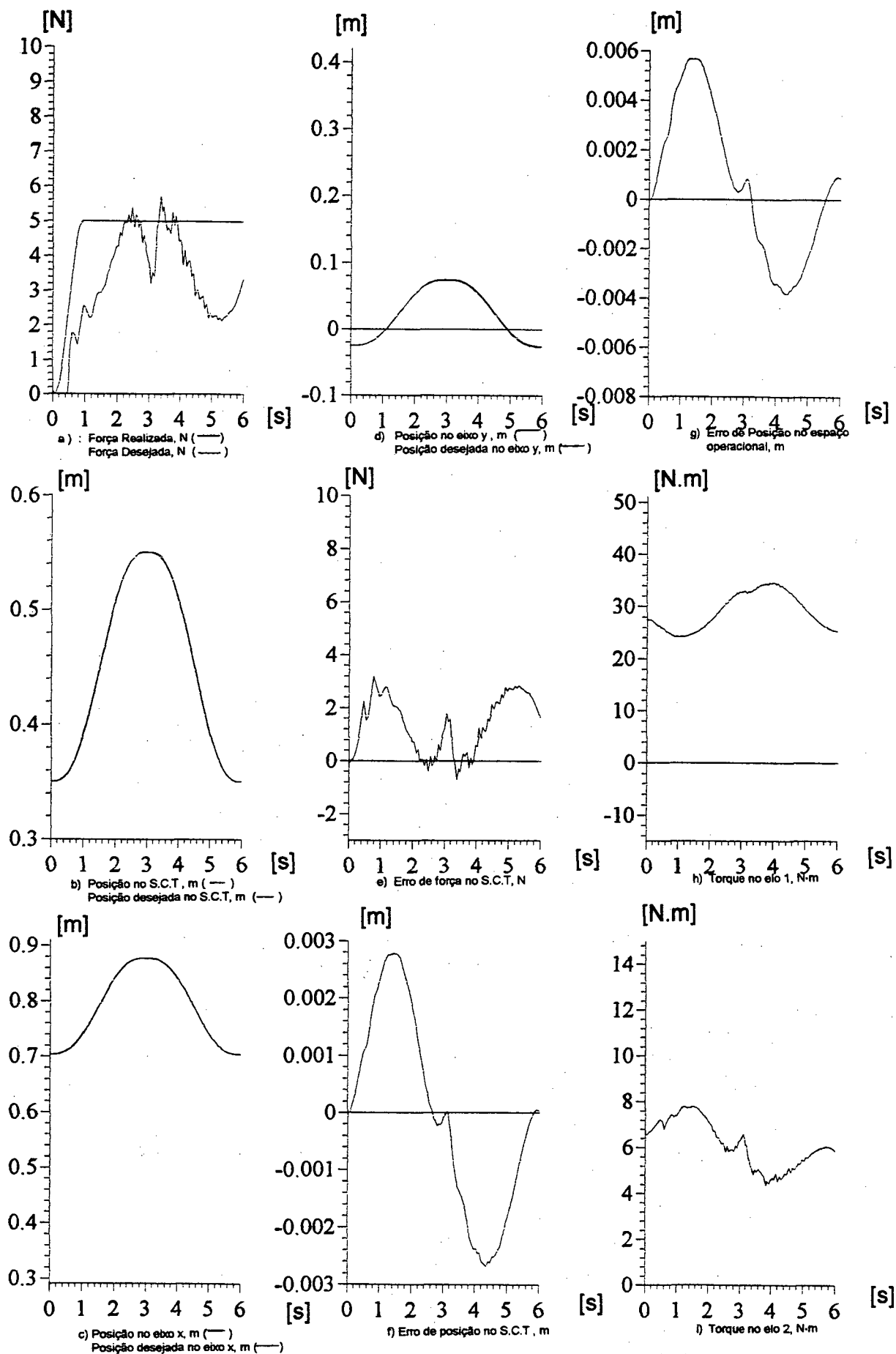


FIGURA 6.8 - CONTROLADOR: RIGIDEZ
CASO 2 - PLANO INCLINADO
TAREFA:3

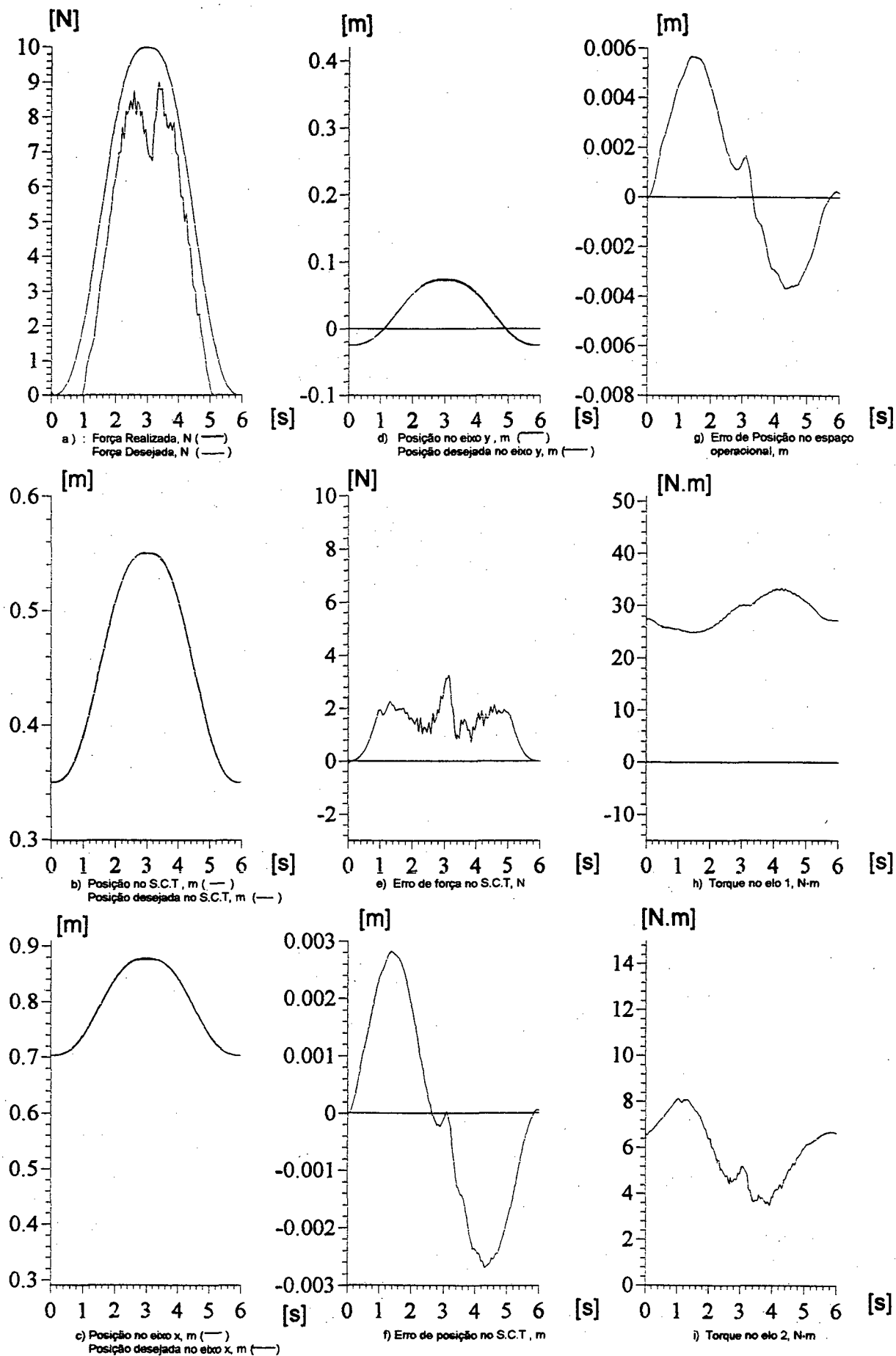


FIGURA 6.9 - CONTROLADOR: RIGIDEZ
CASO 2 - PLANO INCLINADO
TAREFA:4

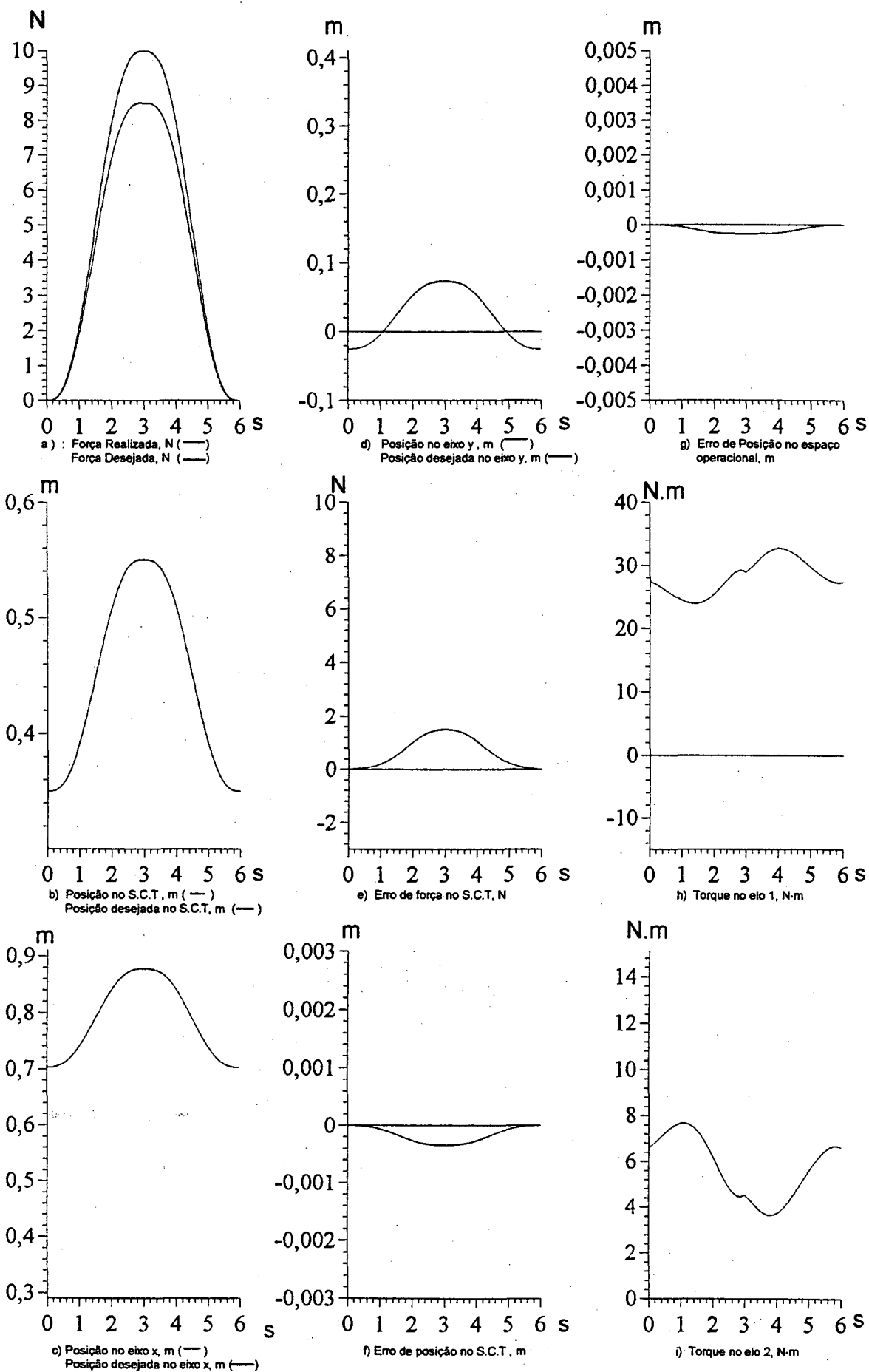


FIGURA 6.10 - CONTROLADOR: RIGIDEZ COM ALGORÍTIMO MODIFICADO
CASO 2 - PLANO INCLINADO
TAREFA: 4

As figuras 6.11 a 6.14 mostram os resultados para a superfície curva (caso 3) na realização das tarefas de 1 a 4 respectivamente, para o controle de rigidez. Os resultados para os erros de força e posição são semelhantes aos anteriores, incluindo o da fig. 6.15, no qual o manipulador é controlado pela lei (6.1), e realiza a tarefa 4.

Os torques de controle para todos os casos, modificam-se de forma suave e não apresentam em nenhum momento, valores acima dos torques de saturação dos motores.

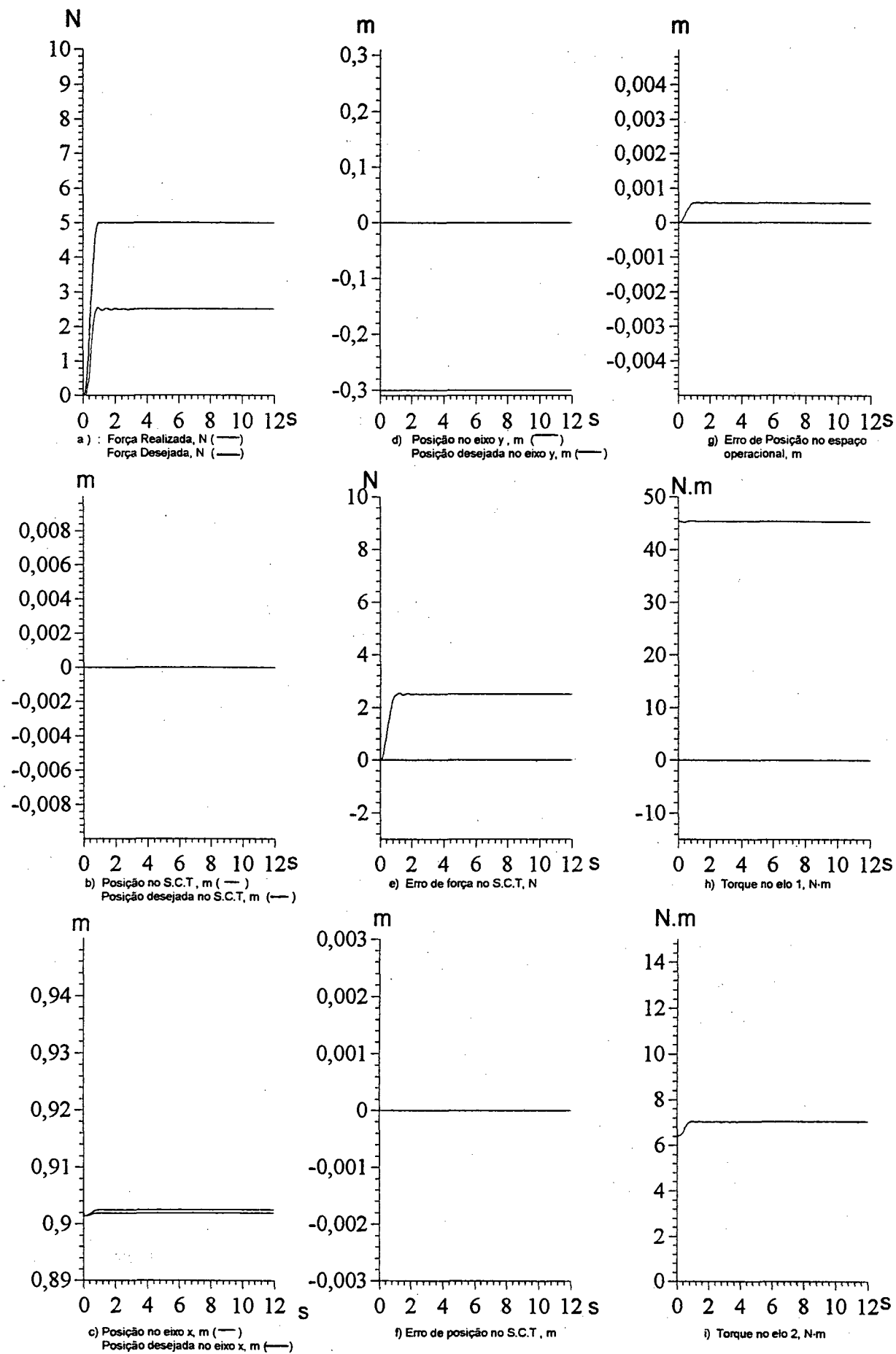


FIGURA 6.11 - CONTROLADOR: RIGIDEZ
CASO 3 - SUPERFÍCIE CURVA
TAREFA: 1

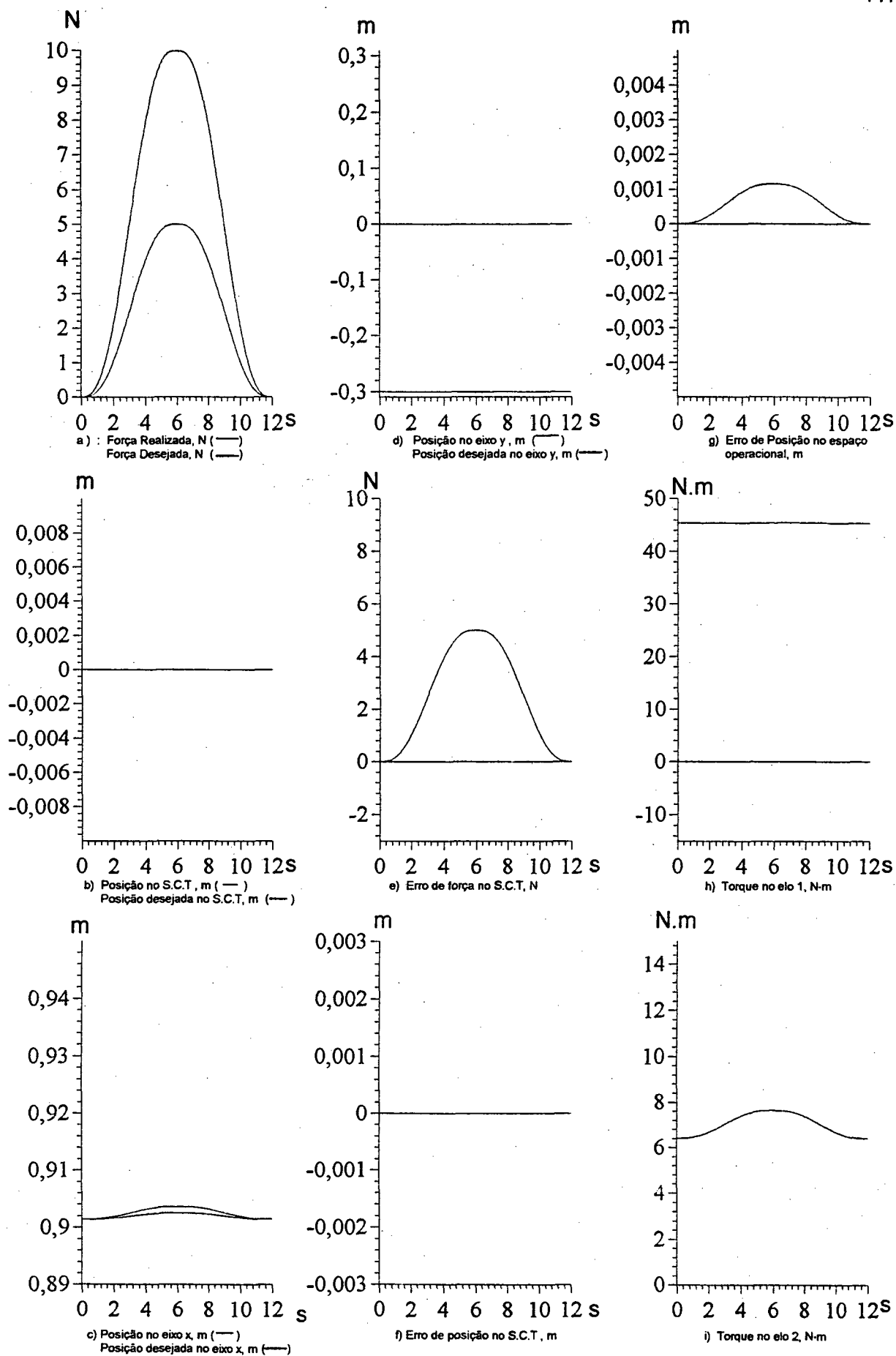


FIGURA 6.12 - CONTROLADOR: RIGIDEZ
CASO 3 - SUPERFÍCIE CURVA
TAREFA: 2

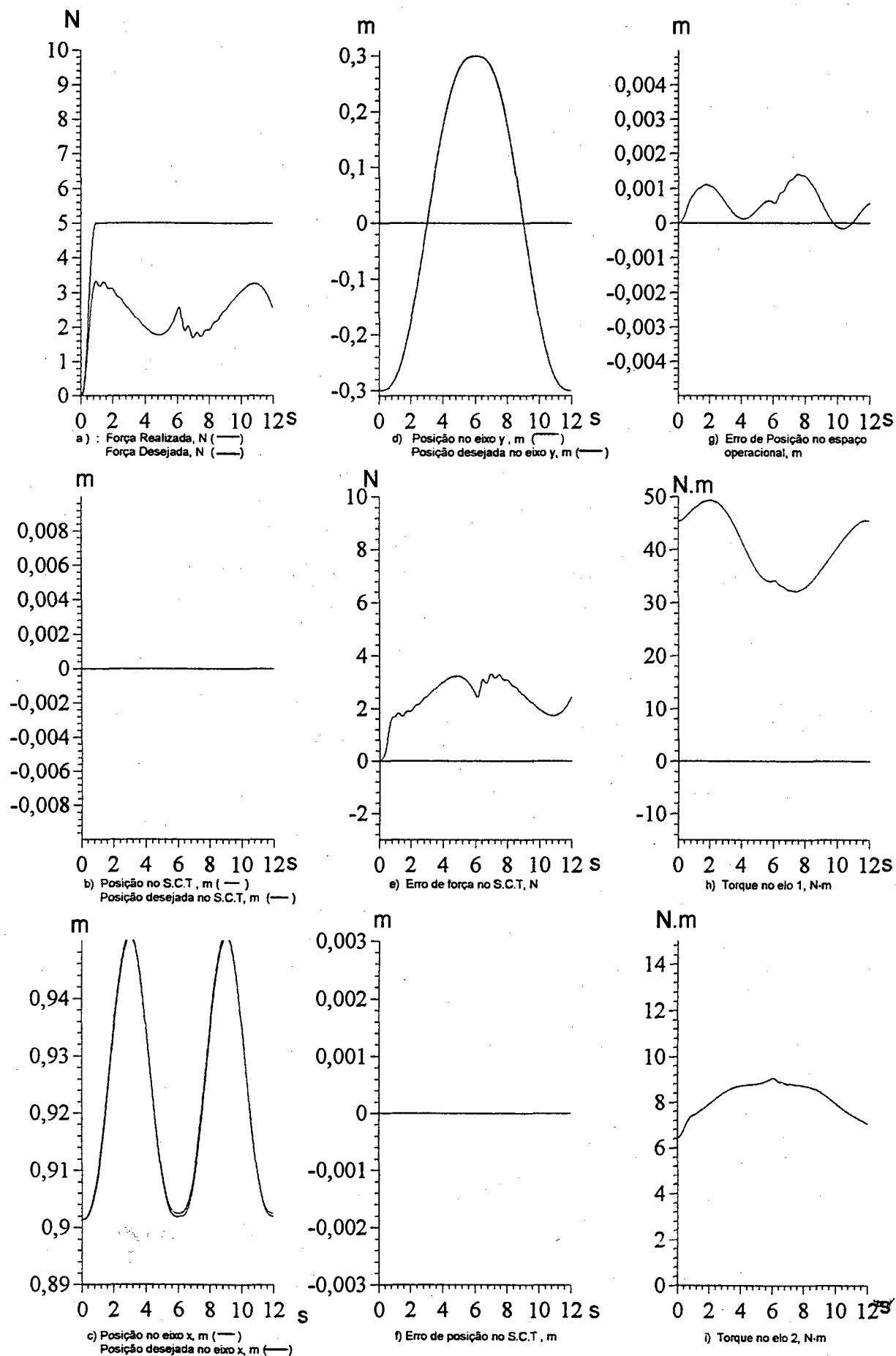


FIGURA 6.13 - CONTROLADOR: RIGIDEZ
CASO 3 - SUPERFÍCIE CURVA
TAREFA: 3

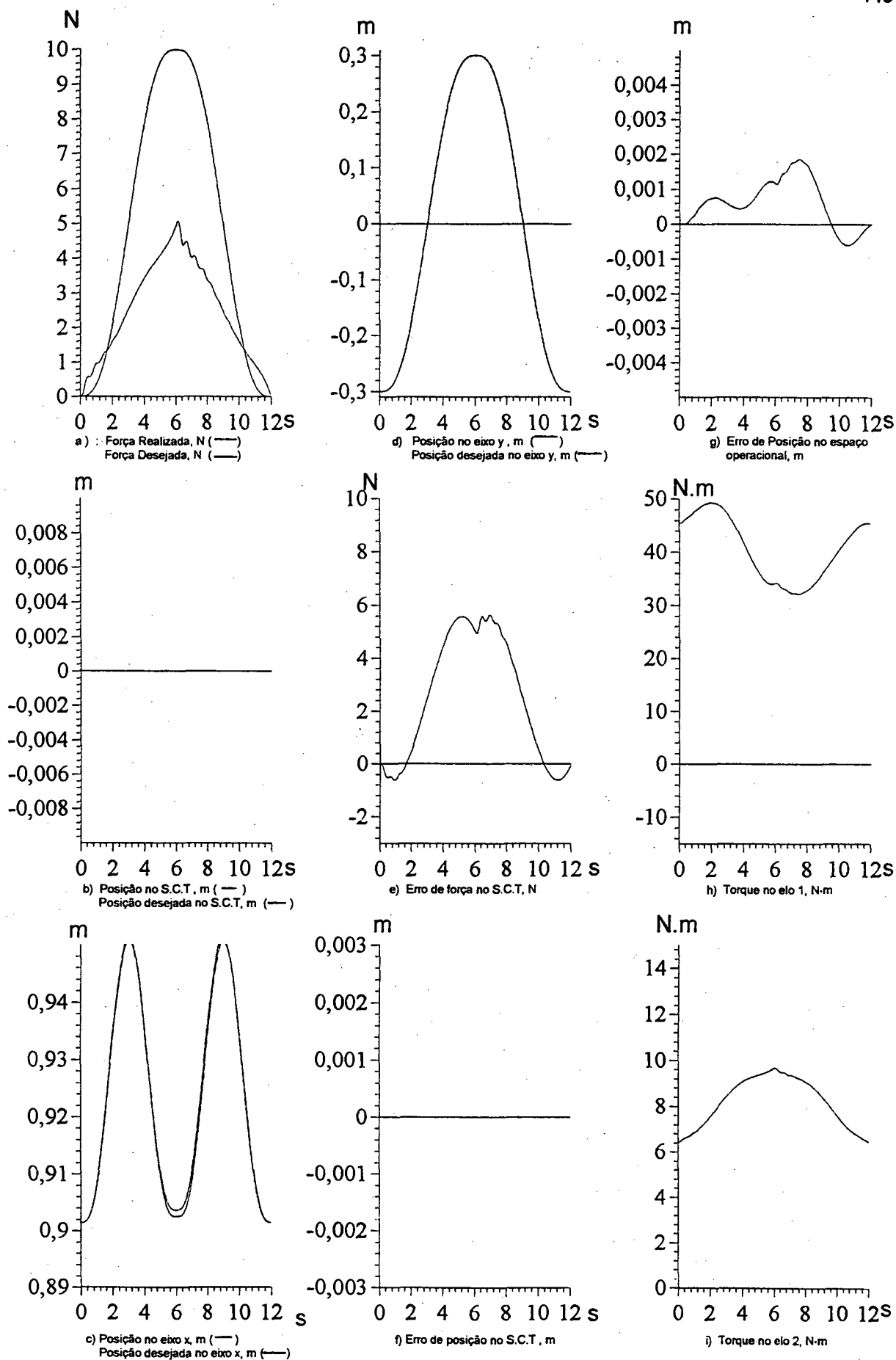


FIGURA 6.14 - CONTROLADOR: RIGIDEZ
CASO 3 - SUPERFÍCIE CURVA
TAREFA: 4

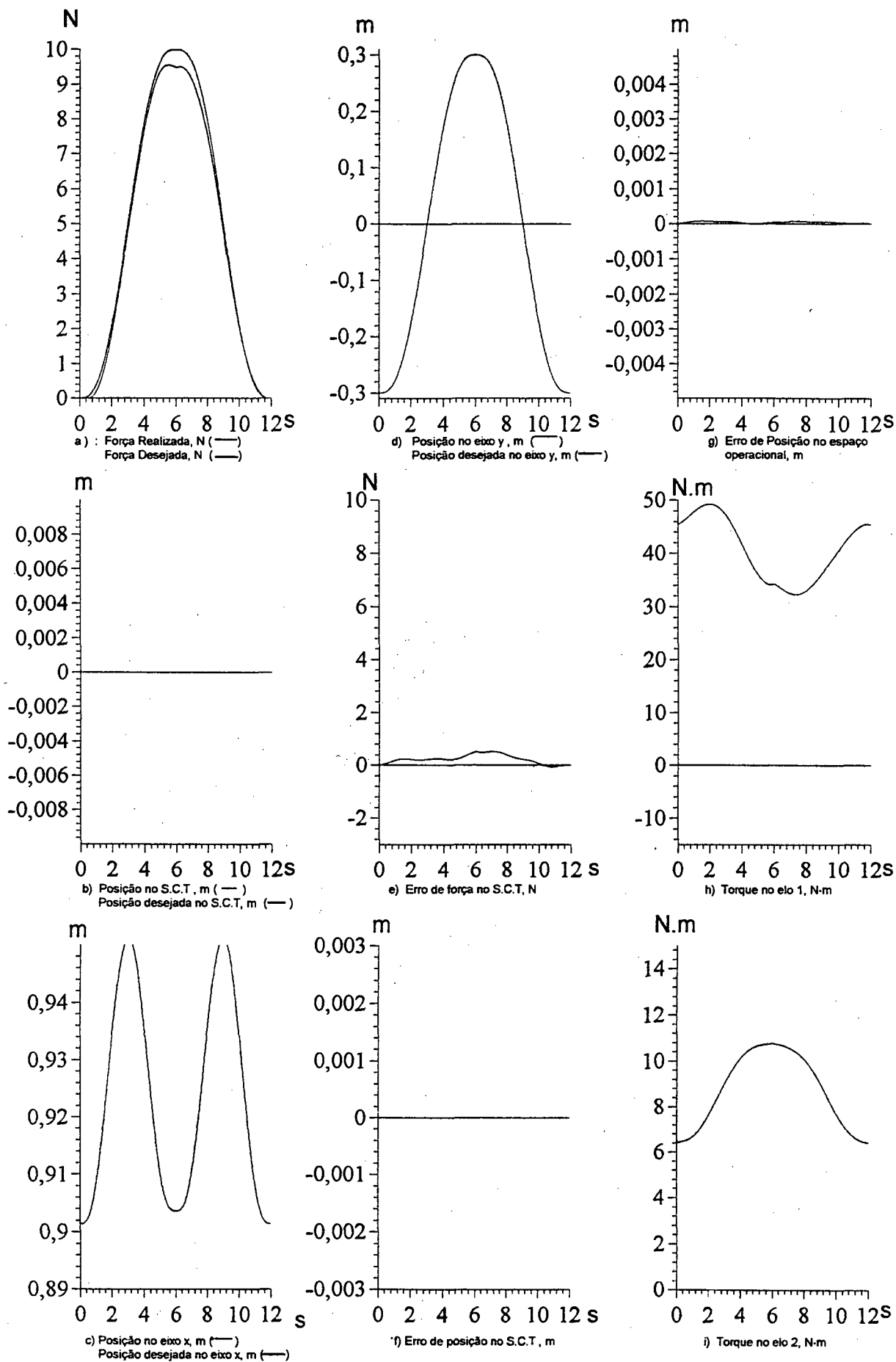


FIGURA 6.15 - CONTROLADOR: RIGIDEZ COM ALGORÍTIMO MODIFICADO
CASO 3 - SUPERFÍCIE CURVA
TAREFA: 4

6.1.2 Controle Híbrido de Força e Posição

Nas figuras 6.16 a 6.19 são apresentados os resultados das simulações para o controlador híbrido, caso 1, nas tarefas de 1 a 4 respectivamente. Nelas pode-se observar que o posicionamento do manipulador mantém-se dentro da trajetória desejada durante toda a tarefa. Os erros, no espaço da tarefa, tanto para força quanto para posição são muito pequenos, sendo praticamente ou mesmo nulos. Isto já era esperado, pois segundo as equações (3.32) e (3.27), o erro de regime é zero. A existência de um pequeno erro nas tarefas 2, 3 e 4 (figuras 6.17, 6.18 e 6.19, respectivamente) é devido ao fato do manipulador continuar em movimento. Na tarefa 1 (fig. 6.16), onde o manipulador deve permanecer numa posição fixa, aplicando uma força constante nota-se que ambos os erros, de força e posição, tendem para zero, uma vez que o manipulador, após alcançado os valores desejados, não movimenta-se mais.

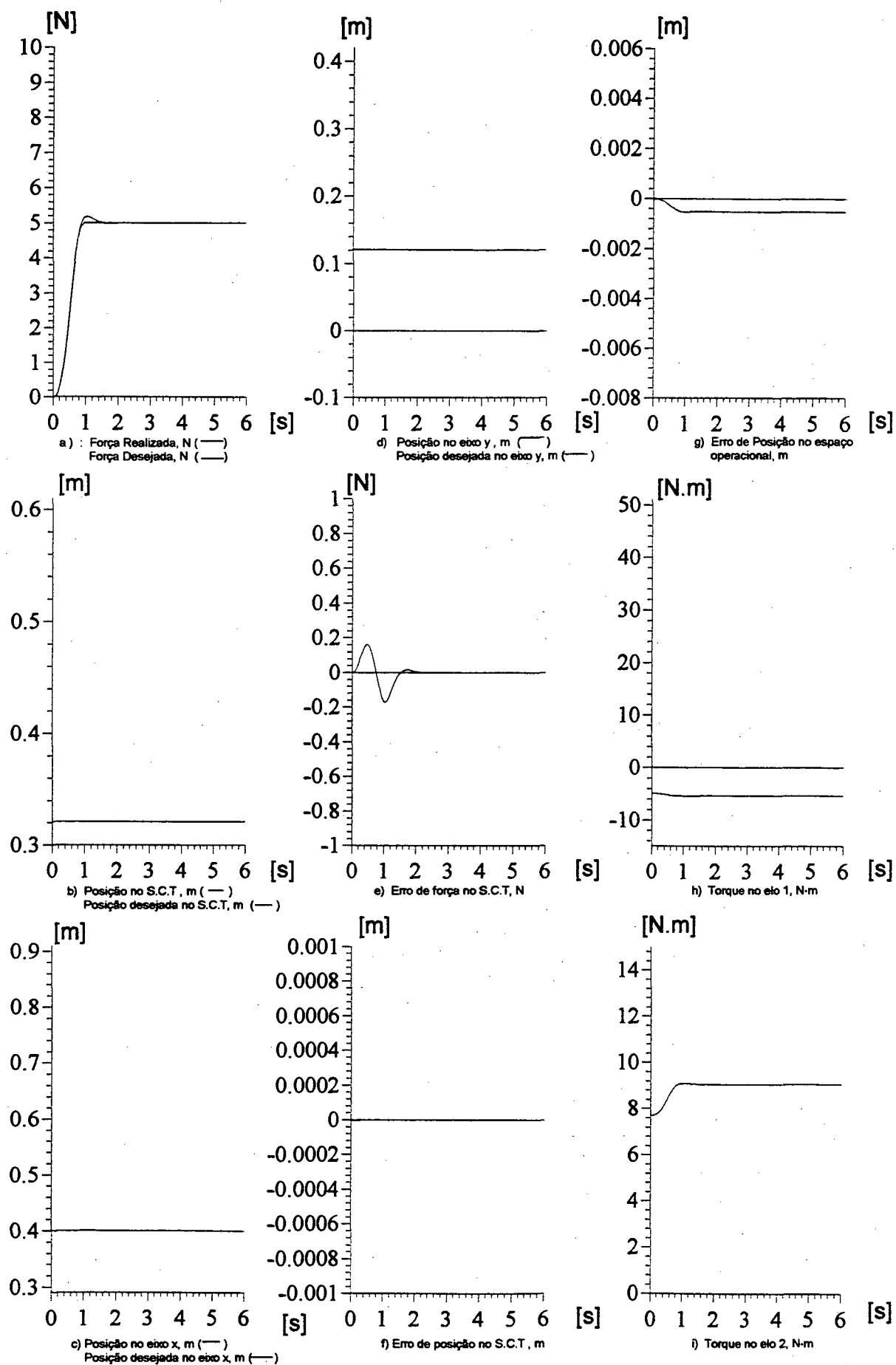


FIGURA 6.16 - CONTROLADOR: HÍBRIDO DE FORÇA E POSIÇÃO
CASO 1 - PLANO VERTICAL
TAREFA:1

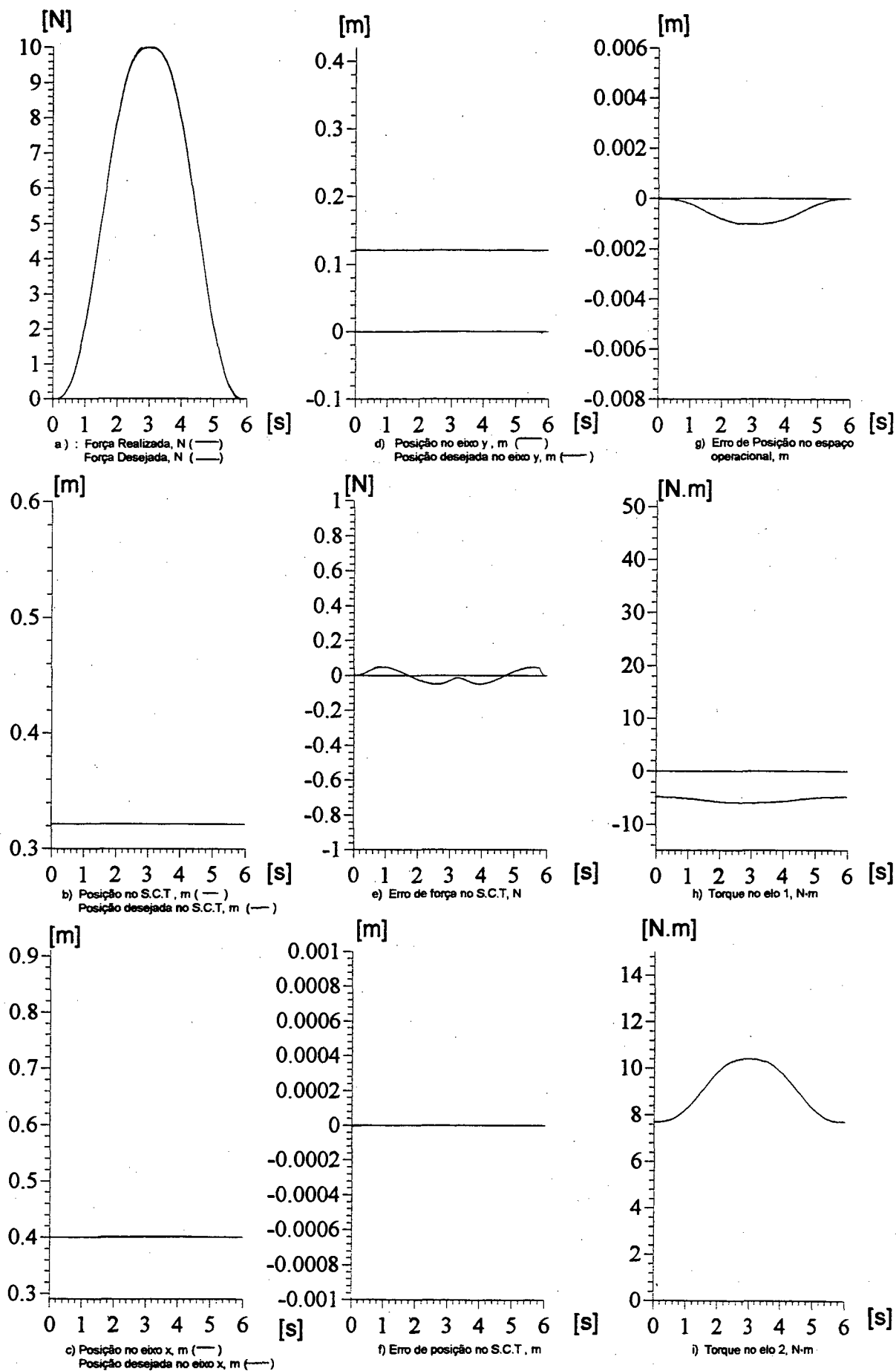


FIGURA 6.17 - CONTROLADOR: HÍBRIDO DE FORÇA E POSIÇÃO
CASO 1 - PLANO VERTICAL
TAREFA:2

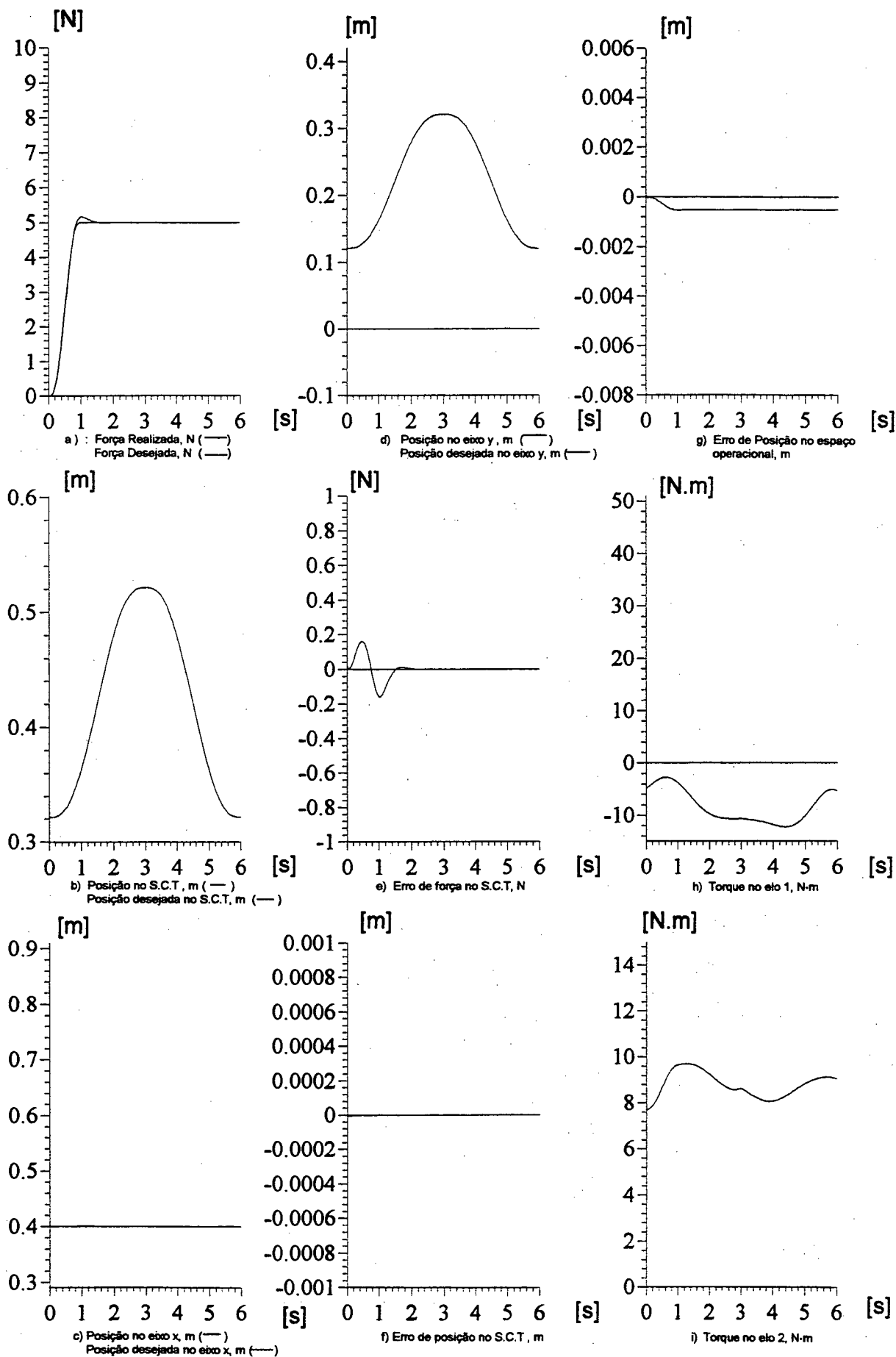


FIGURA 6.18 - CONTROLADOR: HÍBRIDO DE FORÇA E POSIÇÃO
CASO 1 - PLANO VERTICAL
TAREFA:3

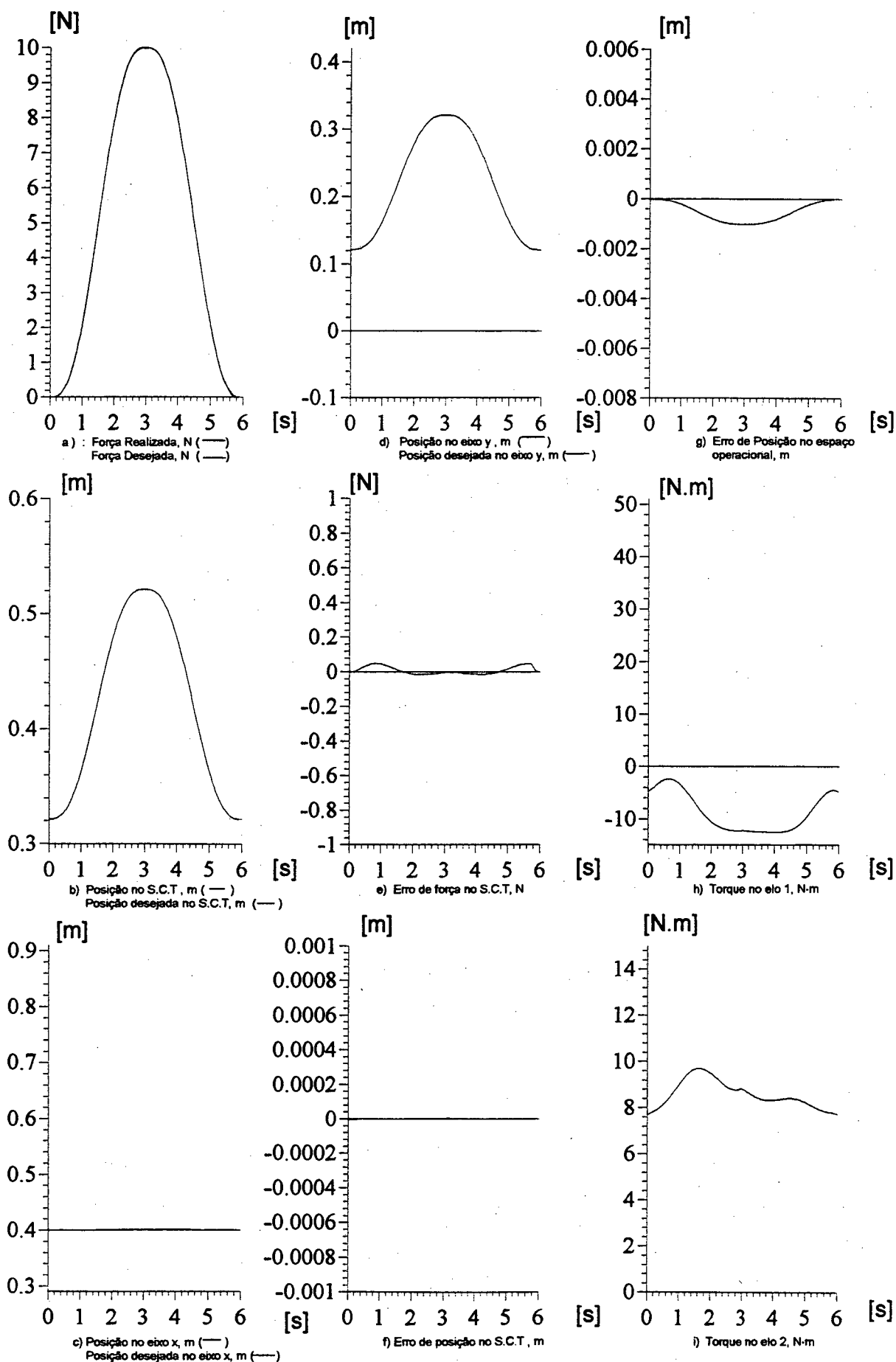


FIGURA 6.19 - CONTROLADOR: HÍBRIDO DE FORÇA E POSIÇÃO
CASO 1 - PLANO VERTICAL
TAREFA:4

Nas figuras 6.20 a 6.23 são apresentados os resultados das simulações para o caso 2, nas tarefas de 1 a 4 respectivamente, nelas observa-se um comportamento muito semelhante ao caso 1, havendo apenas pequenas modificações nos valores dos erros.

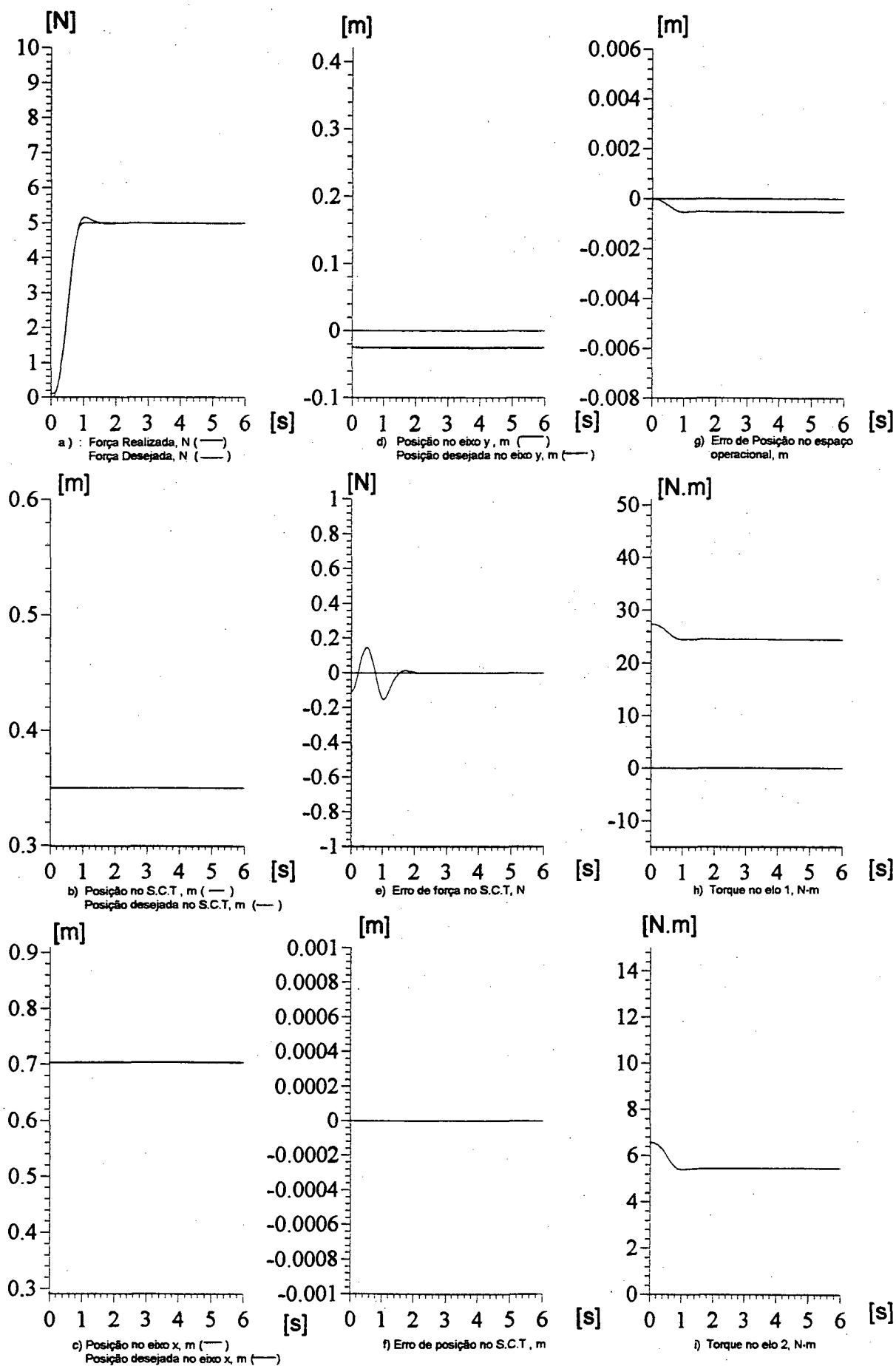
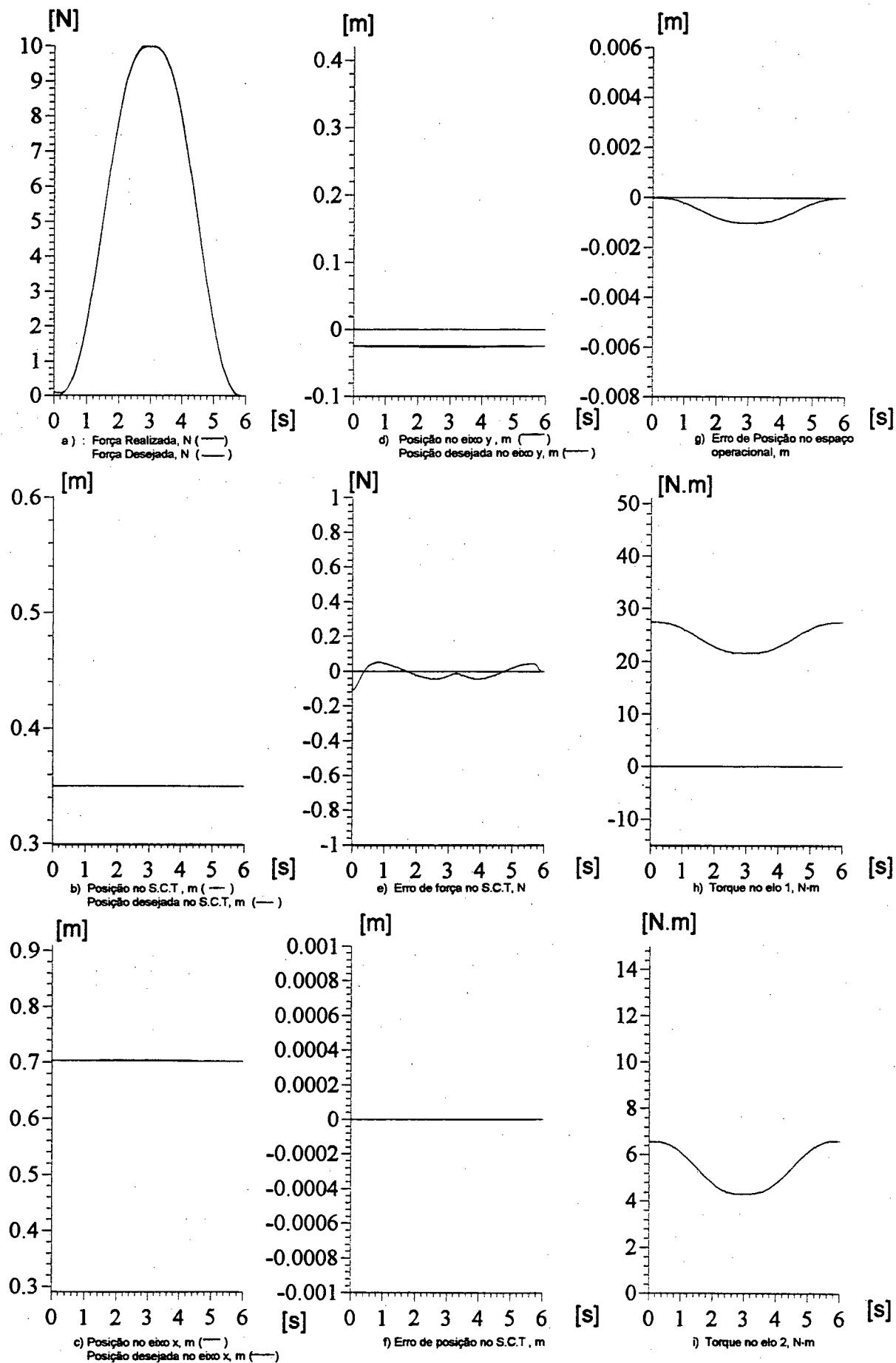


FIGURA 6.20 - CONTROLADOR: HÍBRIDO DE FORÇA E POSIÇÃO
CASO 2 - PLANO INCLINADO
TAREFA:1



**FIGURA 6.21 - CONTROLADOR: HÍBRIDO DE FORÇA E POSIÇÃO
CASO 2 - PLANO INCLINADO
TAREFA:2**

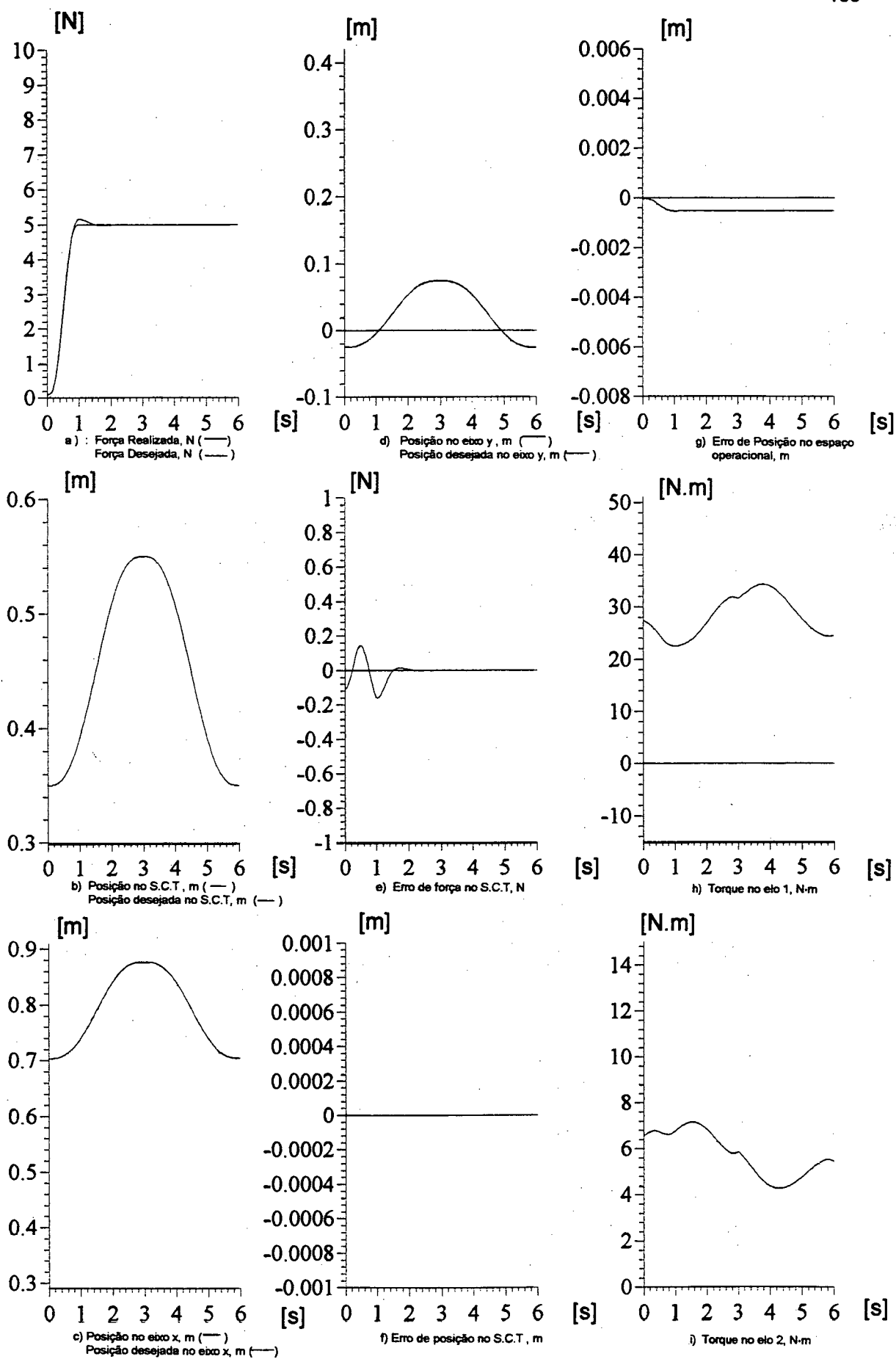


FIGURA 6.22 - CONTROLADOR: HÍBRIDO DE FORÇA E POSIÇÃO
CASO 2 - PLANO INCLINADO
TAREFA:3

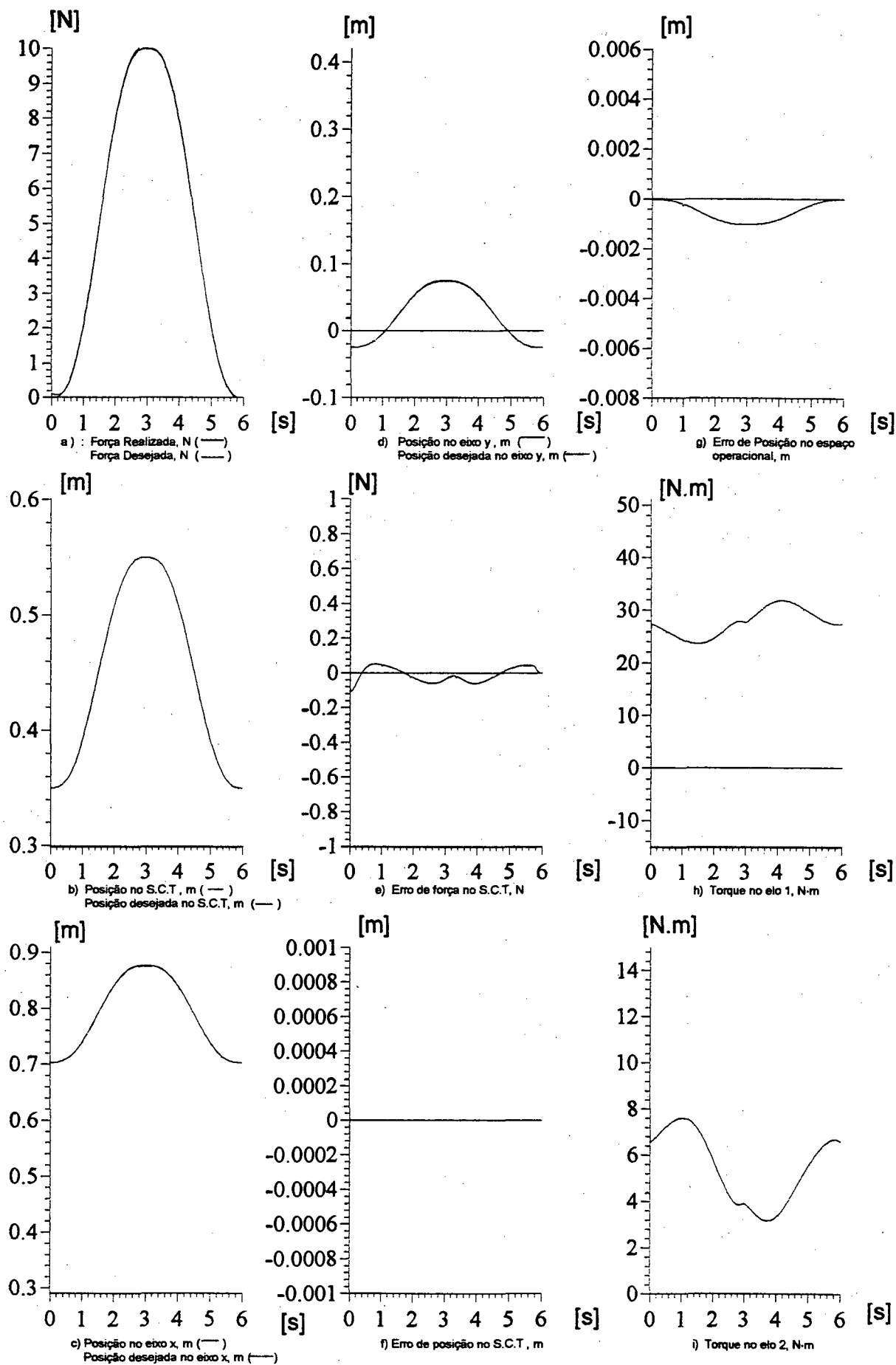
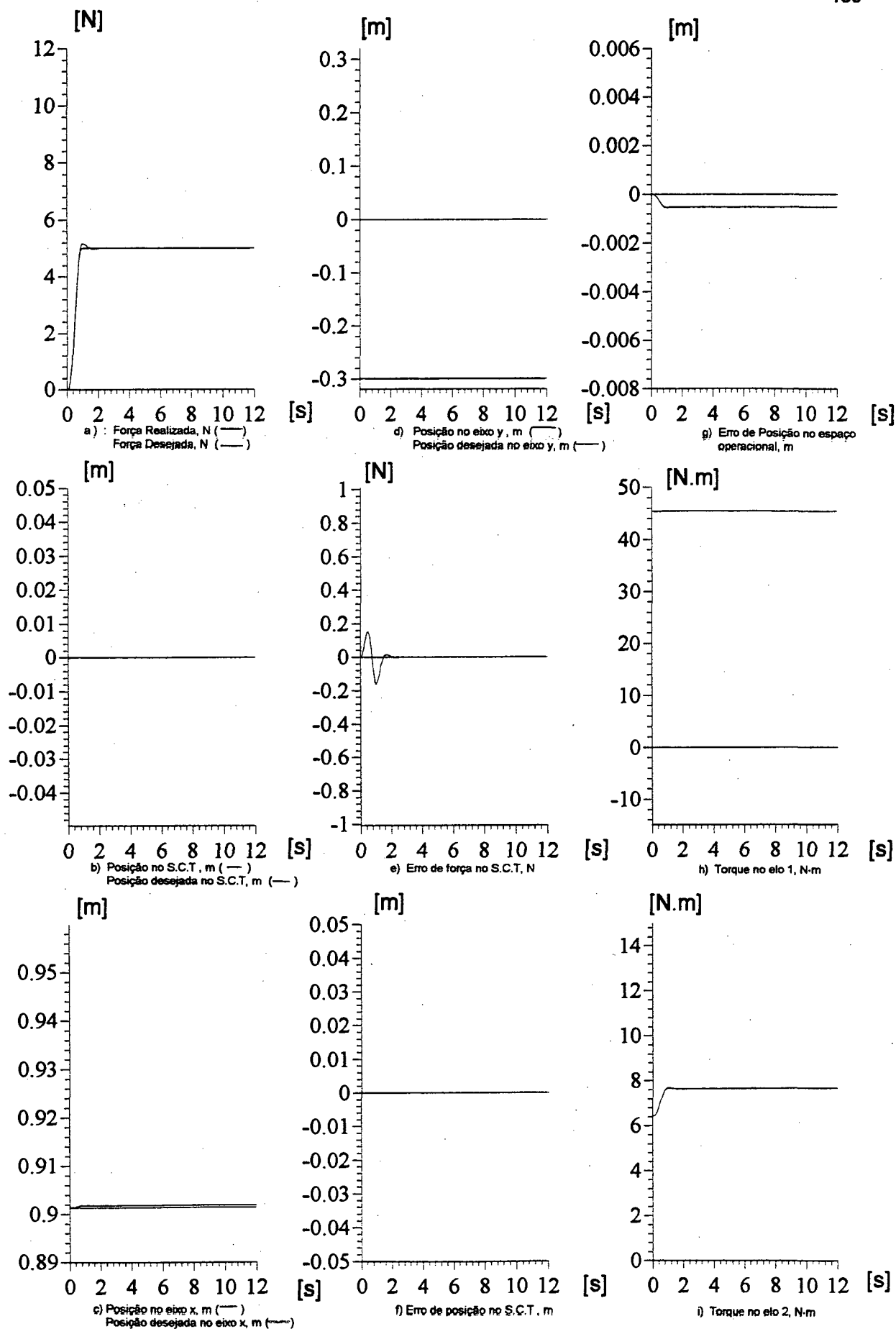


FIGURA 6.23 - CONTROLADOR: HÍBRIDO DE FORÇA E POSIÇÃO
CASO 2 - PLANO INCLINADO
TAREFA:4

Para a superfície curva, nas tarefas de 1 a 4, figuras 6.24 a 6.27 respectivamente, observa-se um comportamento diferente dos apresentados anteriormente para as situações na qual o manipulador está em movimento. Nestas situações (figuras 6.26 e 6.27) aparece um erro de força e posição relativo a não inclusão na lei de controle de um termo que leve em consideração a derivada do Jacobiano, já que este para as situações em que o manipulador está em movimento, se modifica a cada instante. Para as tarefas onde não há movimento significativo do manipulador (figuras 6.24 e 6.25) os resultados apresentados são os mesmos que os dos casos 1 e 2.

Os torques de controle para todos os casos modificam-se de forma suave, e não apresentam em nenhum momento, valores acima dos torques de saturação dos motores.



**FIGURA 6.24 - CONTROLADOR: HÍBRIDO DE FORÇA E POSIÇÃO
CASO 3 - SUPERFÍCIE CURVA
TAREFA:1**

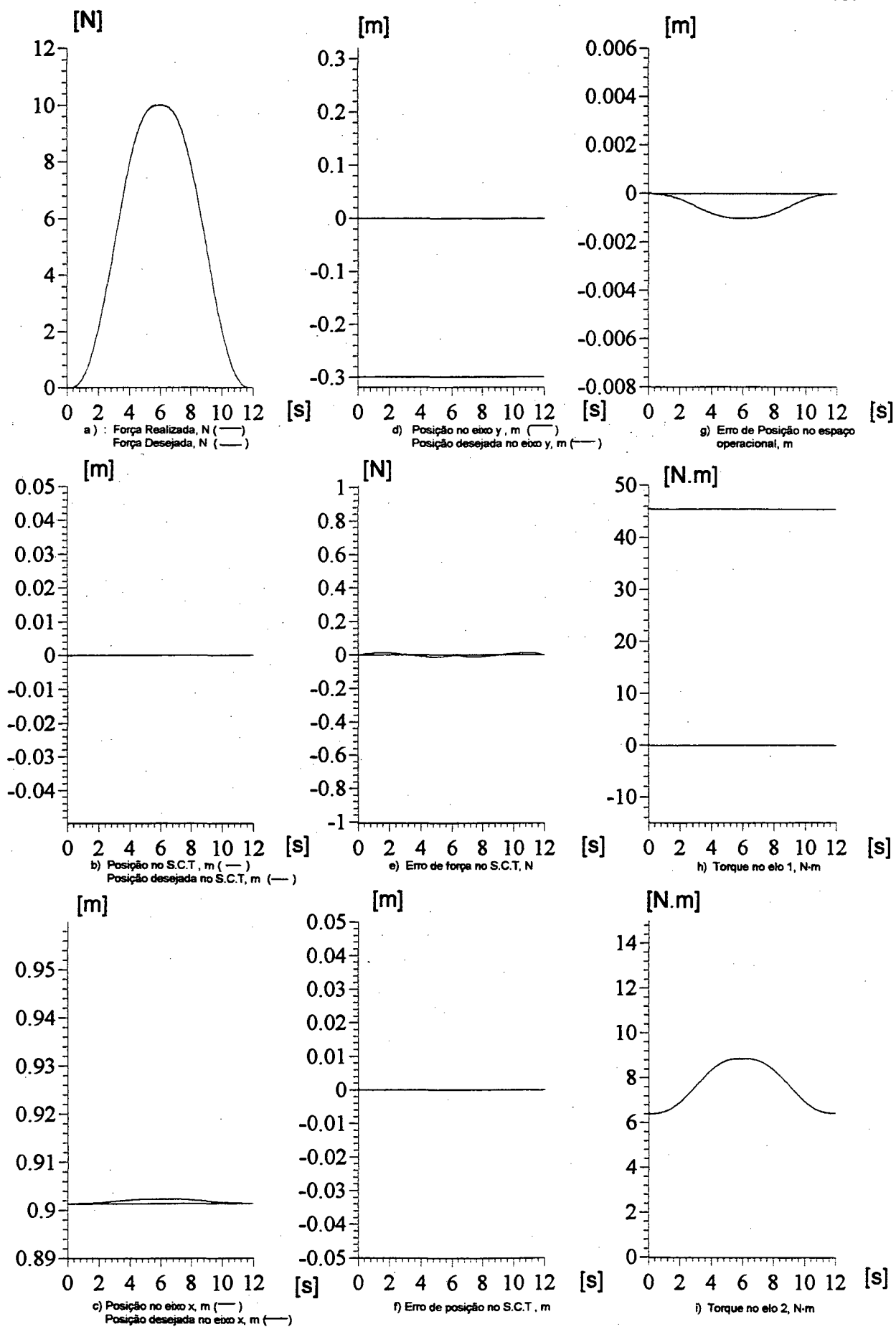


FIGURA 6.25 - CONTROLADOR: HÍBRIDO DE FORÇA E POSIÇÃO
CASO 3 - SUPERFÍCIE CURVA
TAREFA:2

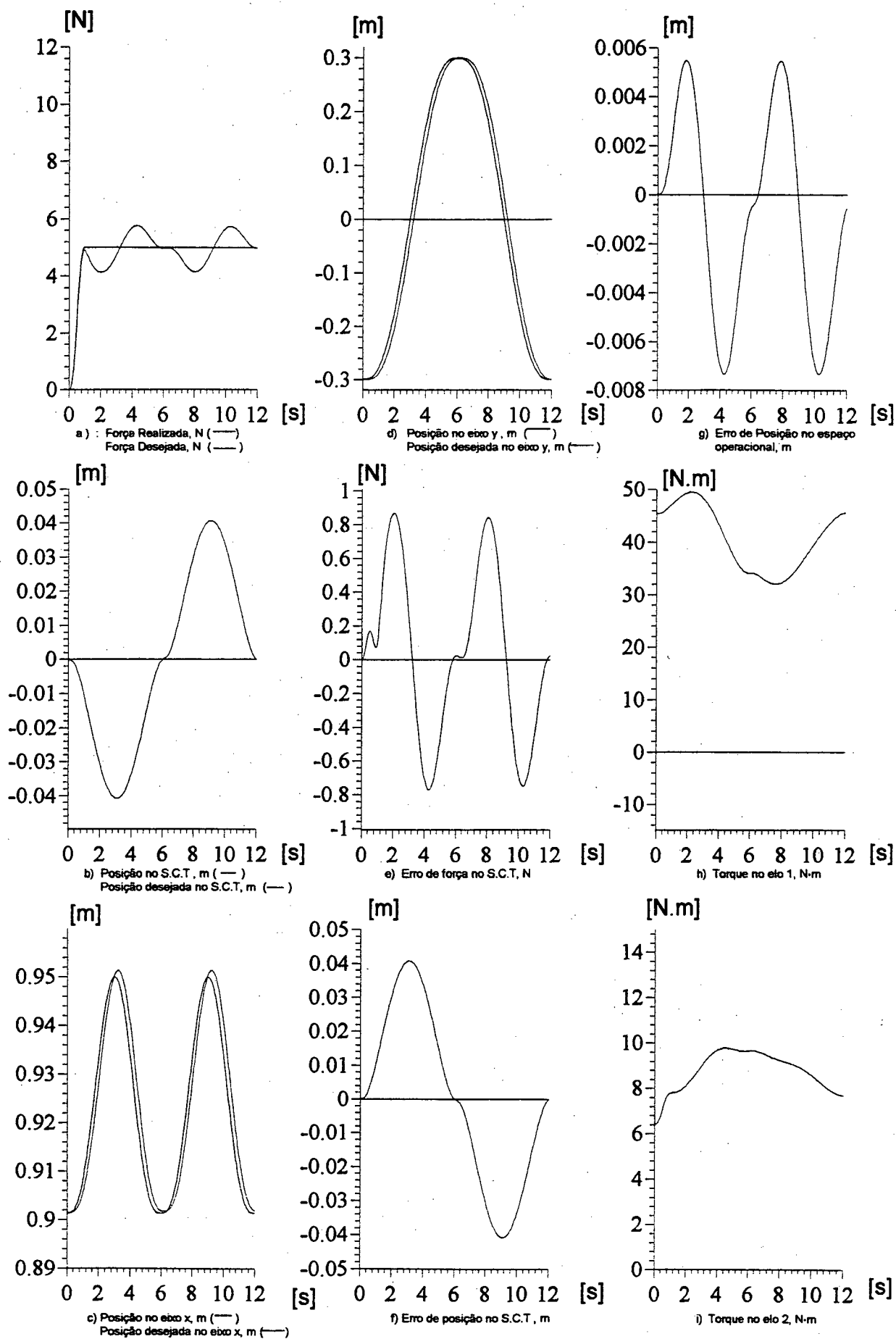


FIGURA 6.26 - CONTROLADOR: HÍBRIDO DE FORÇA E POSIÇÃO
CASO 3 - SUPERFÍCIE CURVA
TAREFA:3

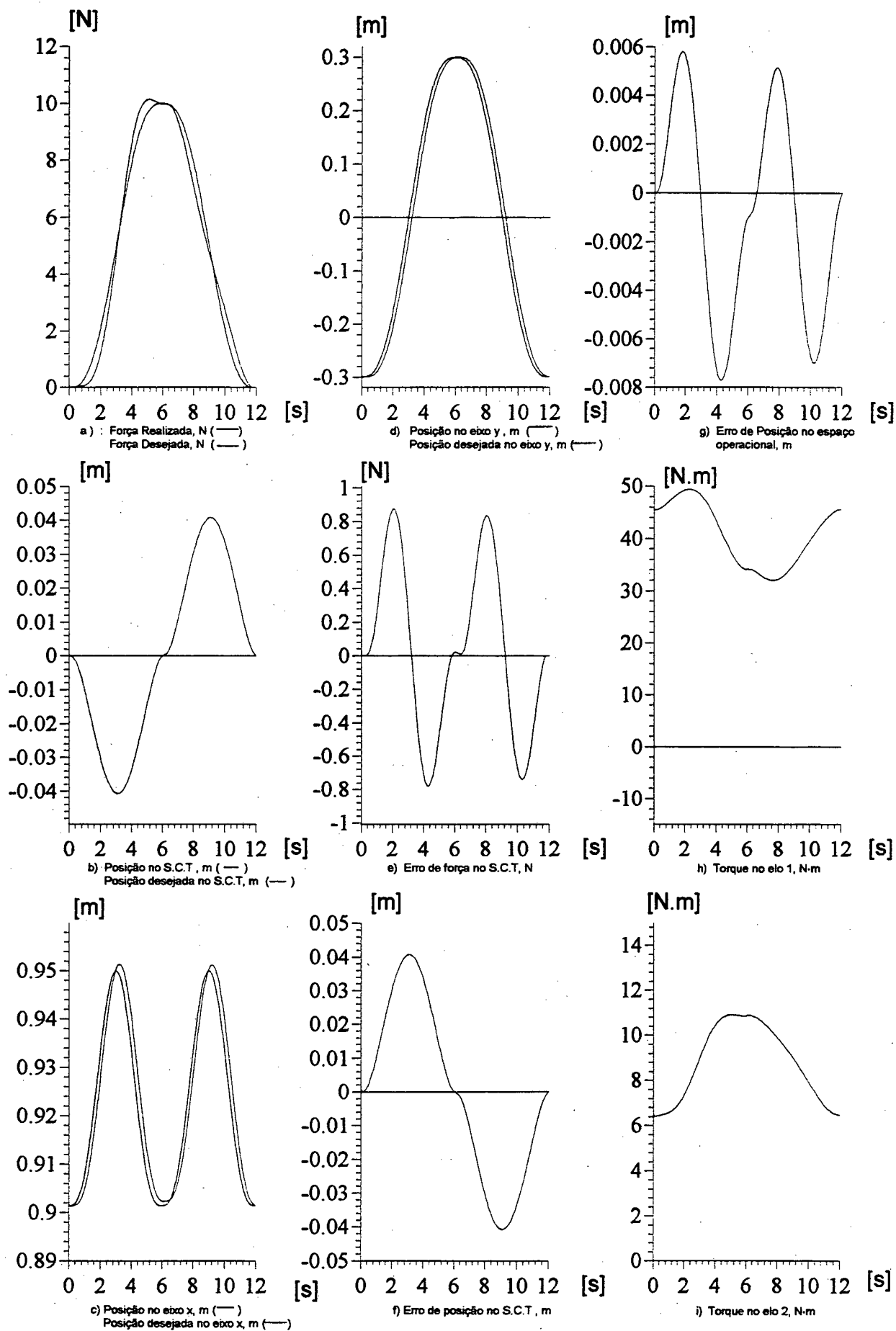


FIGURA 6.27 - CONTROLADOR: HÍBRIDO DE FORÇA E POSIÇÃO
CASO 3 - SUPERFÍCIE CURVA
TAREFA:4

6.1.3 Controle no Espaço Operacional

O resultado das simulações para o controle operacional foi exatamente o mesmo que o do controle híbrido nas tarefas relativas ao caso 1 e 2 (planos vertical e inclinado) e nas tarefas 1 e 2 para a curva. Um resultado diferente é apresentado para a superfície curva nas tarefas 3 e 4, nas quais o manipulador se movimenta, devido a falta de um termo relativo a derivada das matrizes de seleção, que são variáveis no tempo. Estes resultados são mostrados nas figuras 6.28 e 6.29 (tarefas 3 e 4, respectivamente). Observe que existe um grande erro tanto de força quanto de posição para o manipulador. Note ainda que estes erros crescem com o aumento da velocidade de deslocamento do manipulador, como no controle híbrido.

Como nos demais controladores, o torque nos motores está dentro do limite tolerado e sua variação ocorre de forma suave.

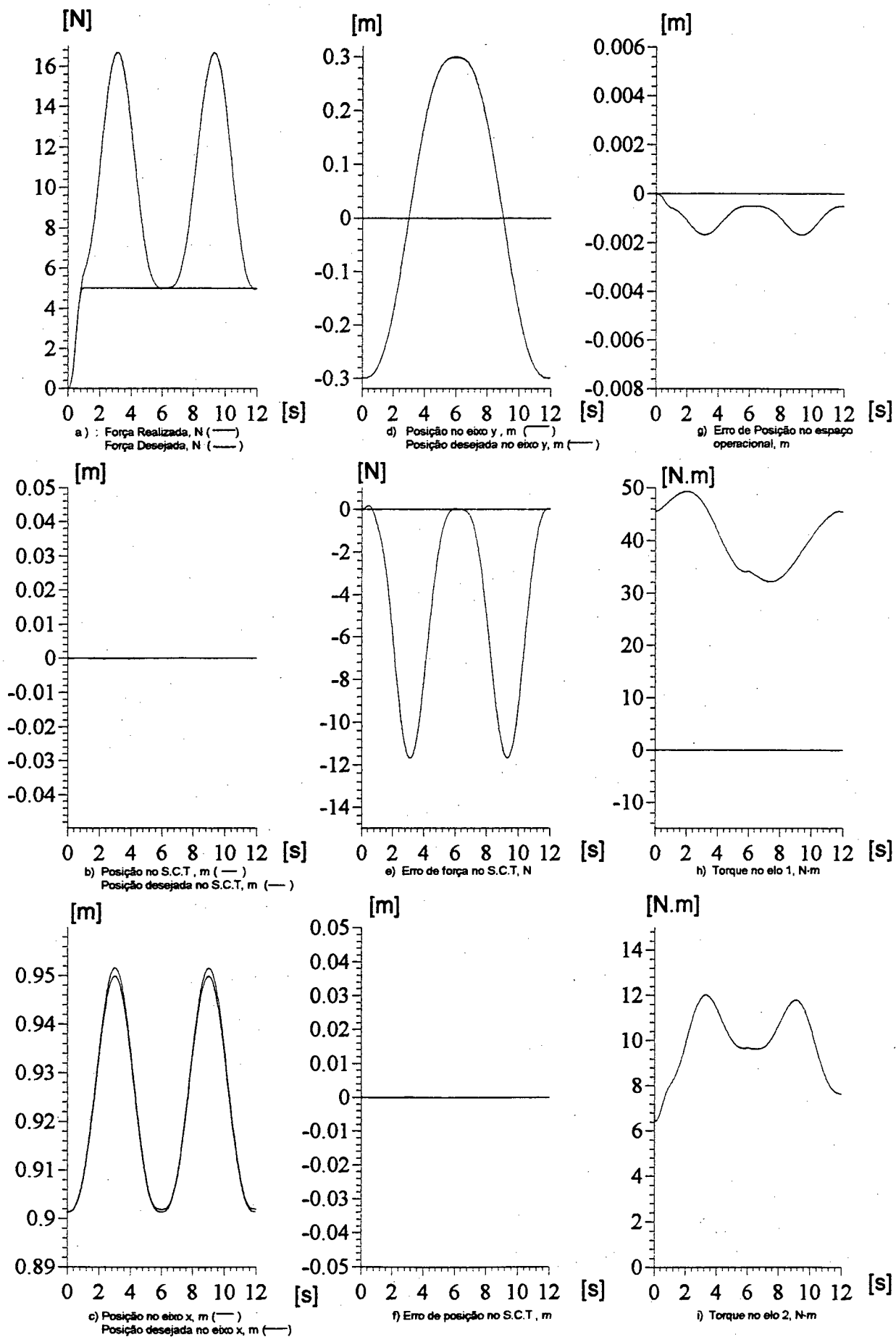


FIGURA 6.28 - CONTROLADOR: OPERACIONAL
CASO 3 - SUPERFÍCIE CURVA
TAREFA:3

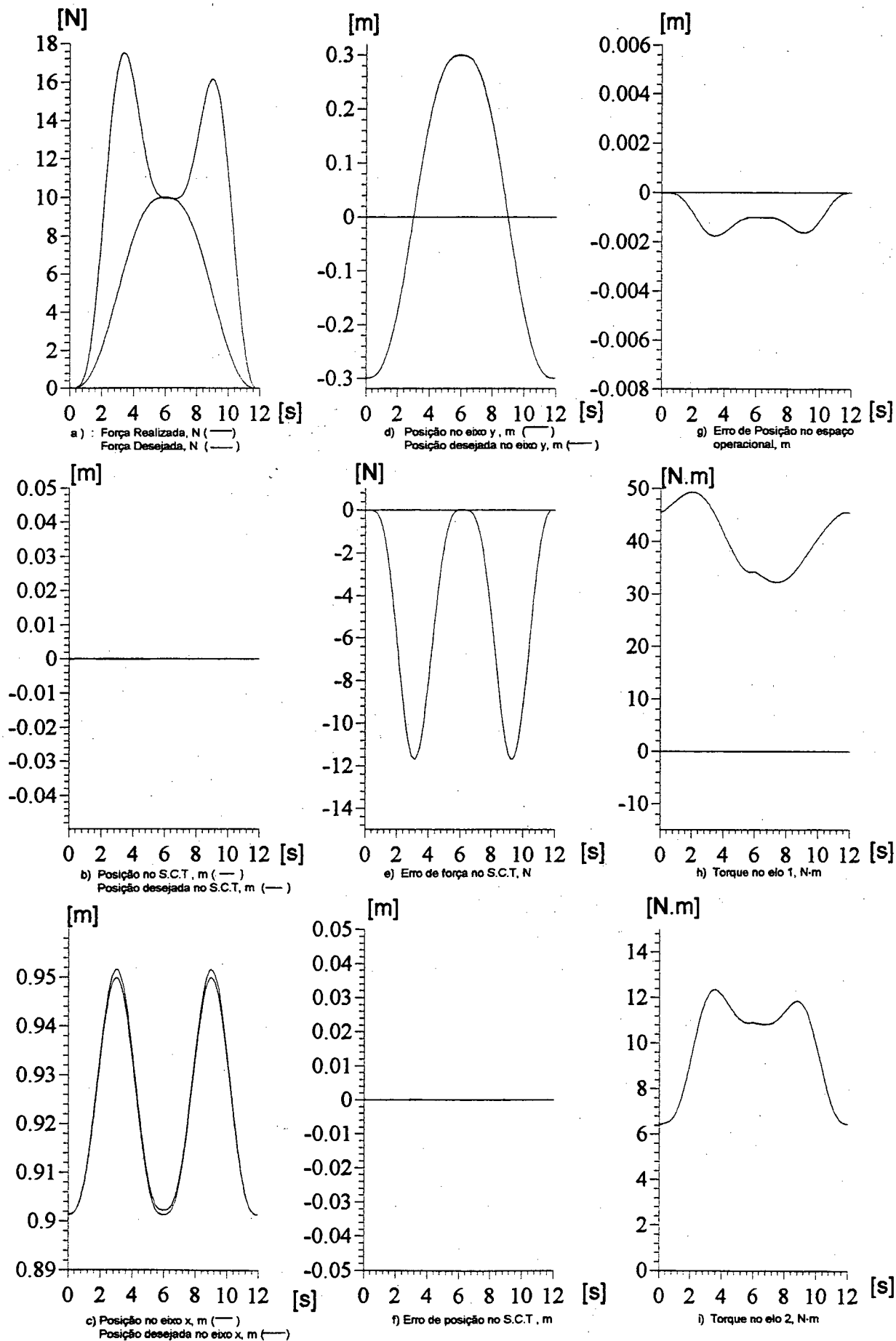


FIGURA 6.29 - CONTROLADOR: OPERACIONAL
CASO 3 - SUPERFÍCIE CURVA
TAREFA:4

6.1.4 Controle Paralelo

Nas figuras 6.30 a 6.33 são apresentados os resultados das simulações do controle paralelo, para o plano vertical (caso 1), nas tarefas de 1 a 4 respectivamente. Nas figuras 6.30 e 6.32 o erro de força tende para zero como é esperado. Entretanto, nas figuras 6.31 e 6.33 existe um erro na força exercida pelo manipulador proporcional a velocidade deste. A explicação para isto é que como o controle integral geralmente é lento, necessita-se de um ajuste de ganhos conforme a velocidade empregada ao manipulador para que o sistema mantenha os erros numa faixa aceitável.

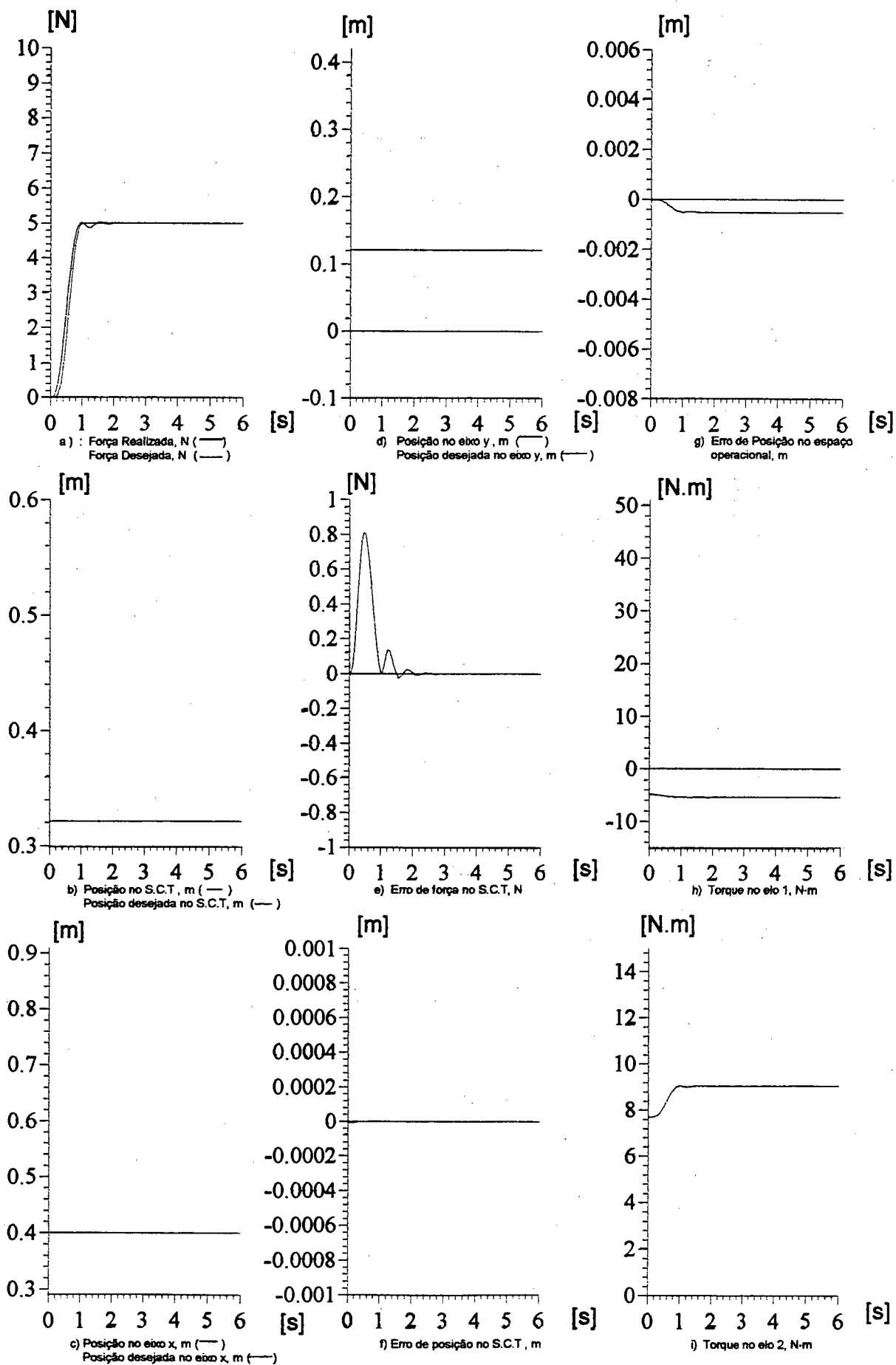


FIGURA 6.30 - CONTROLADOR: PARALELO
CASO 1 - PLANO VERTICAL
TAREFA:1

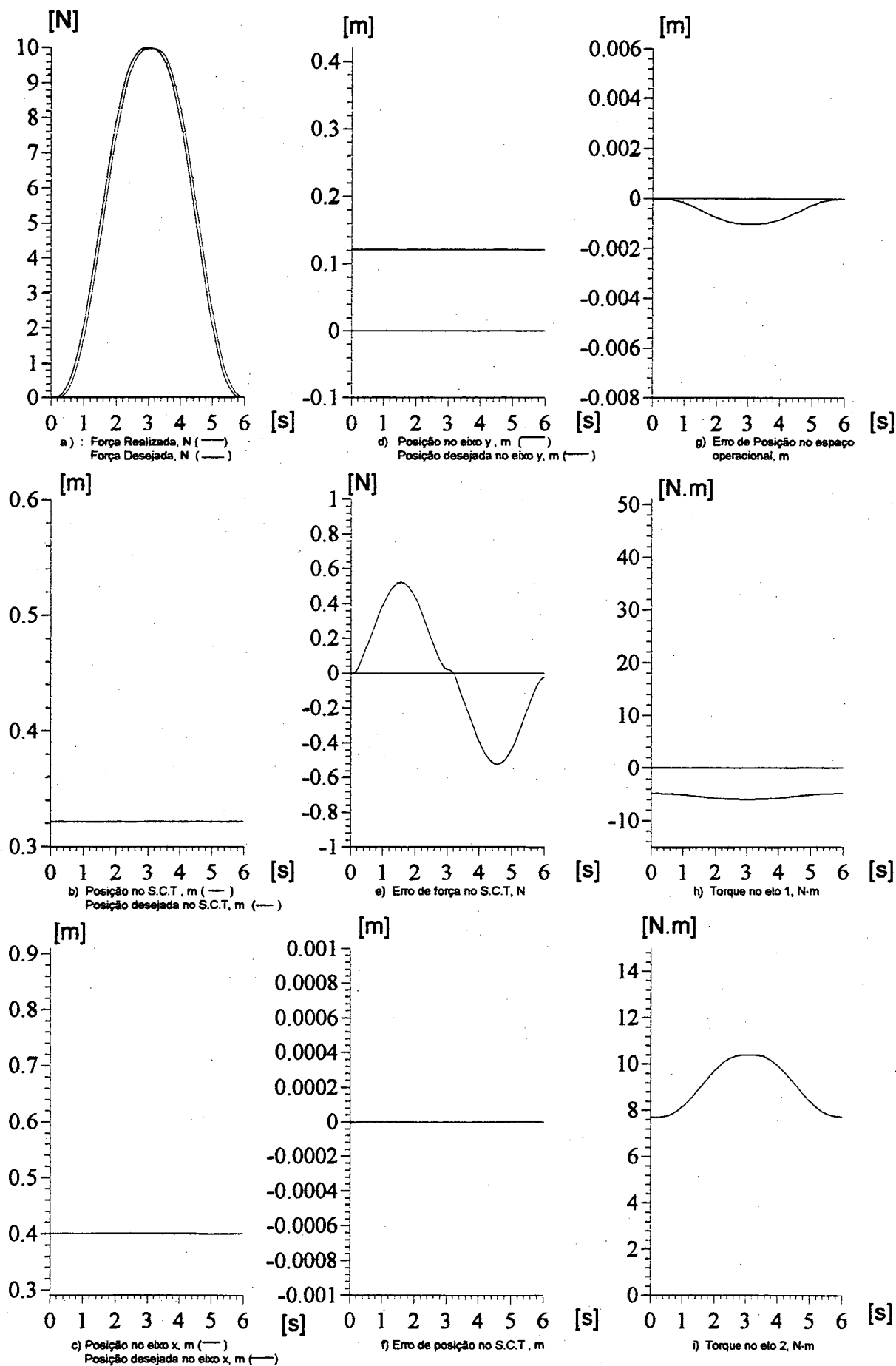


FIGURA 6.31 - CONTROLADOR: PARALELO
CASO 1 - PLANO VERTICAL
TAREFA:2

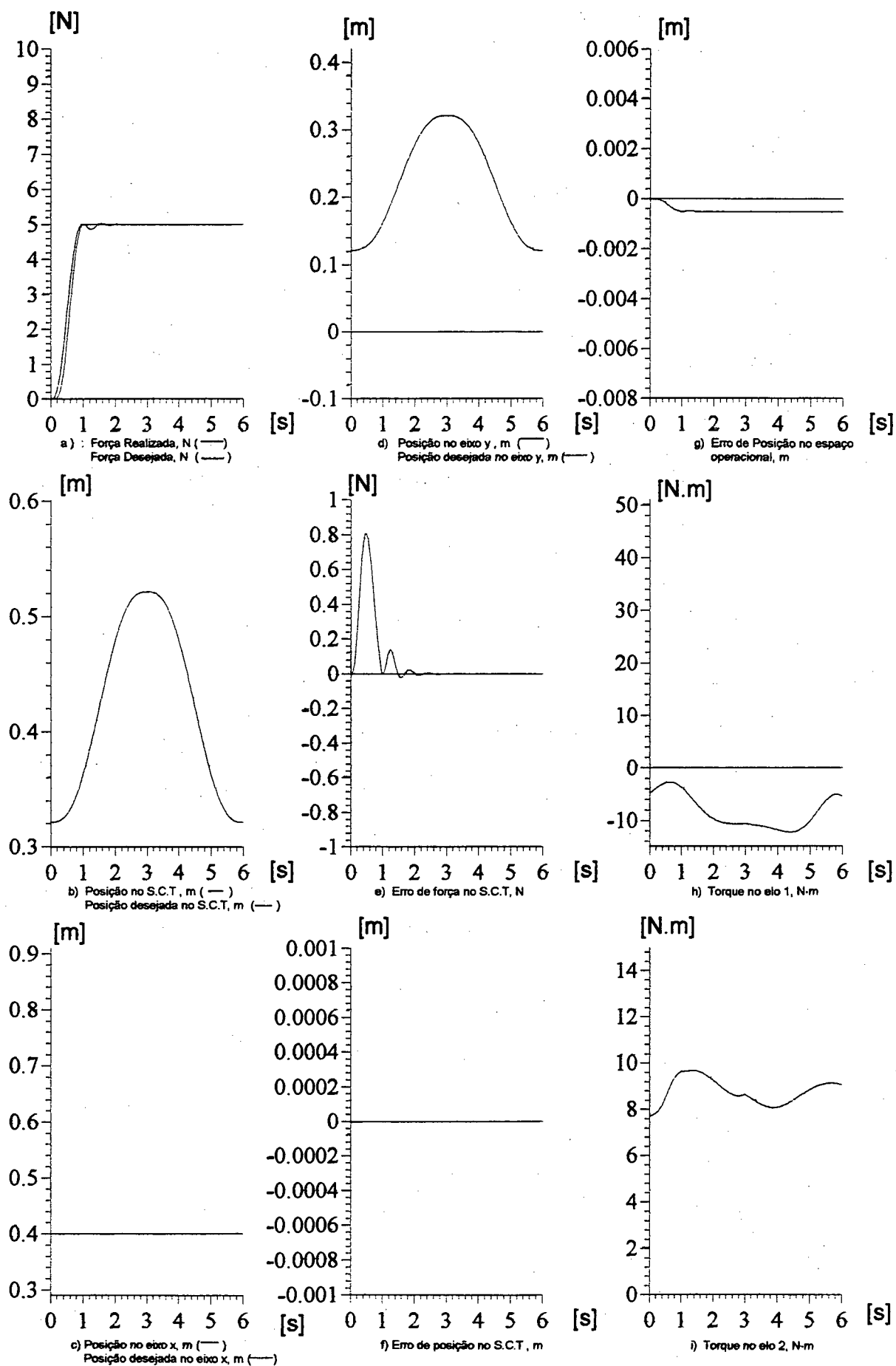


FIGURA 6.32 - CONTROLADOR: PARALELO
CASO 1 - PLANO VERTICAL
TAREFA:3

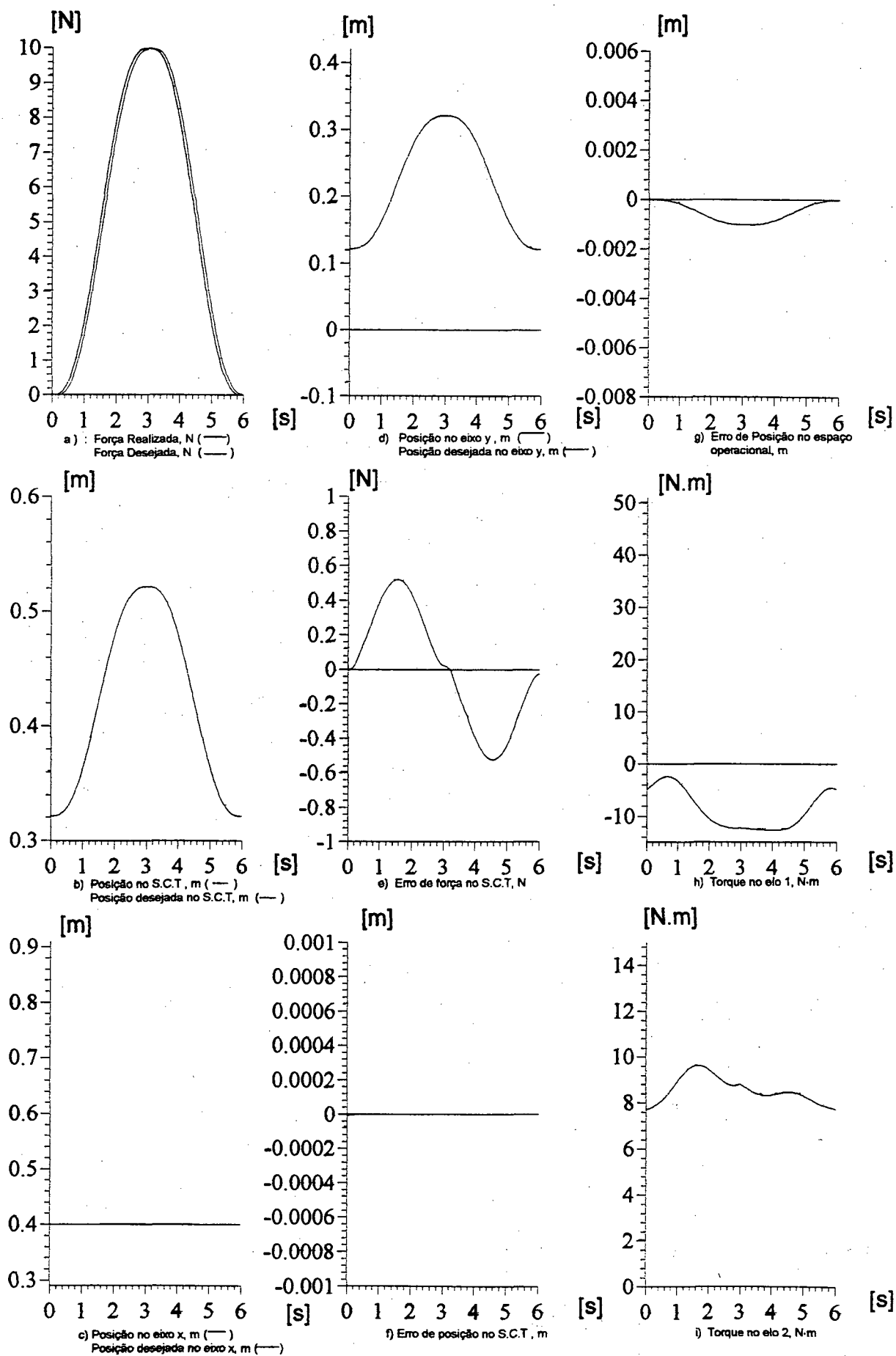


FIGURA 6.33 - CONTROLADOR: PARALELO
CASO 1 - PLANO VERTICAL
TAREFA:4

Nas figuras 6.34 a 6.37 são apresentados os resultados das simulações do controle paralelo, para o plano inclinado (caso 2), nas tarefas de 1 a 4 respectivamente. Observa-se que os erros de força para uma mesma tarefa, possuem uma grande semelhança com os erros verificados no caso 1 pelos mesmos motivos.

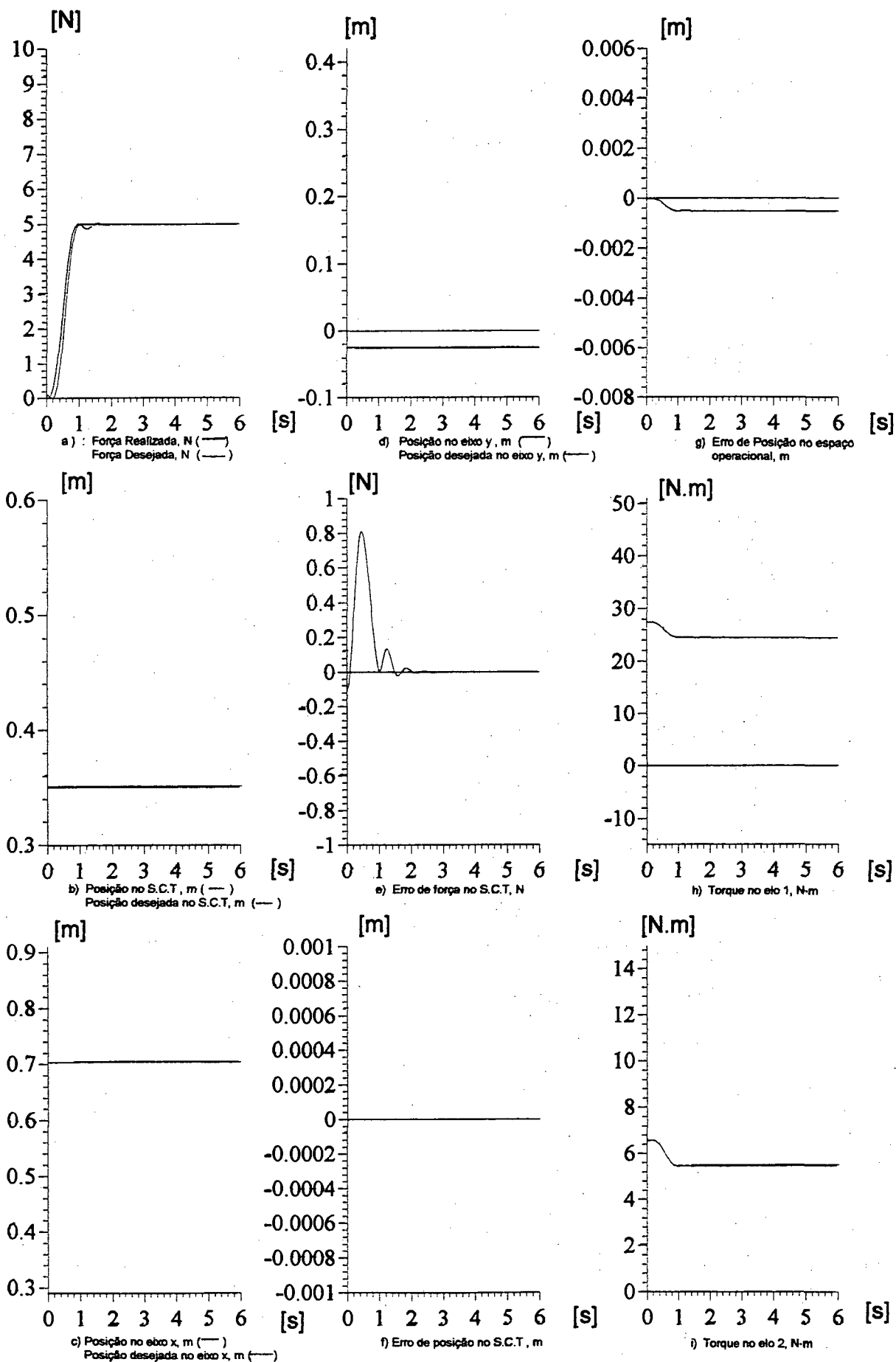


FIGURA 6.34 - CONTROLADOR: PARALELO
CASO 2 - PLANO INCLINADO
TAREFA:1

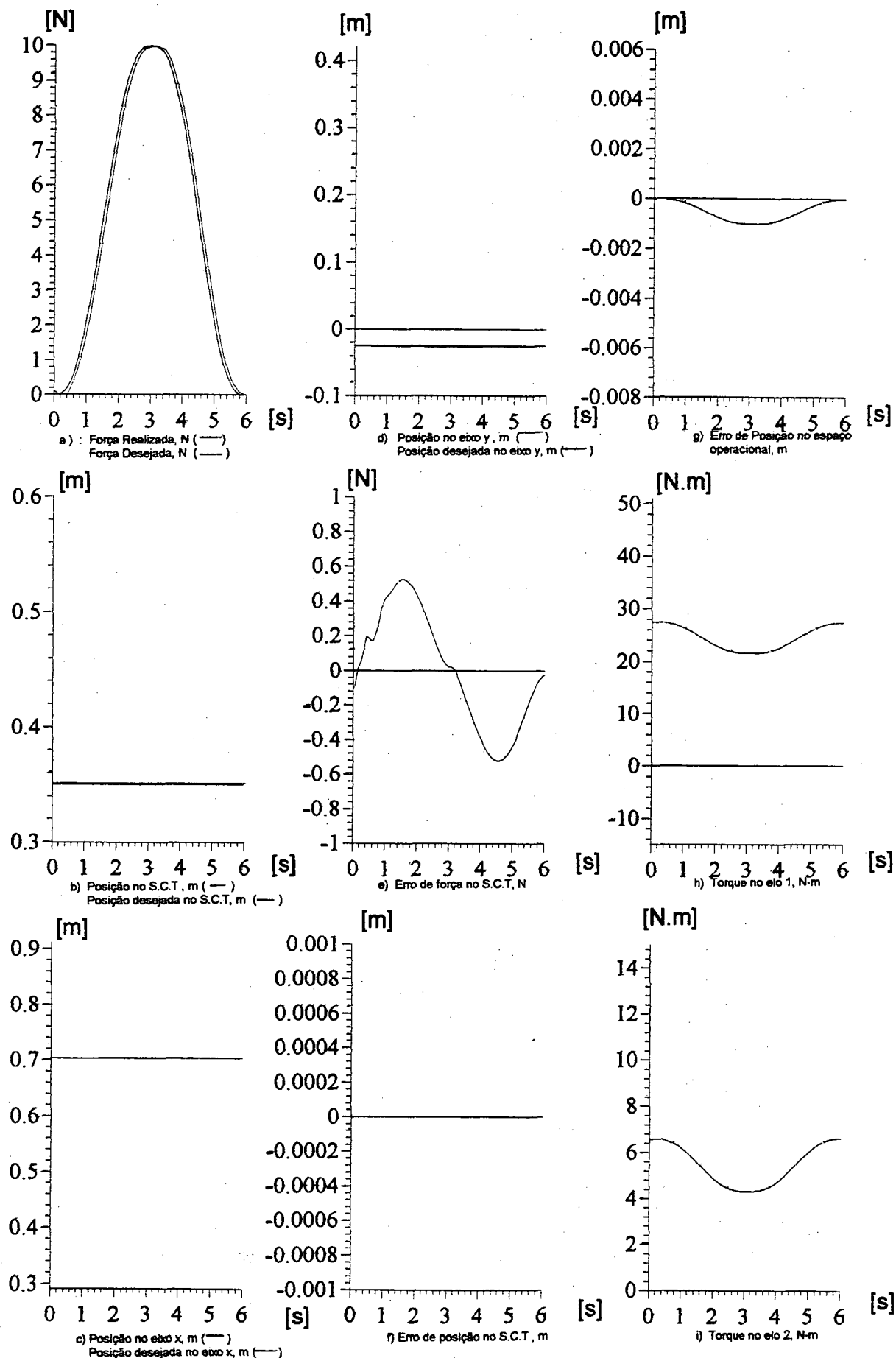


FIGURA 6.35 - CONTROLADOR: PARALELO
CASO 2 - PLANO INCLINADO
TAREFA:2

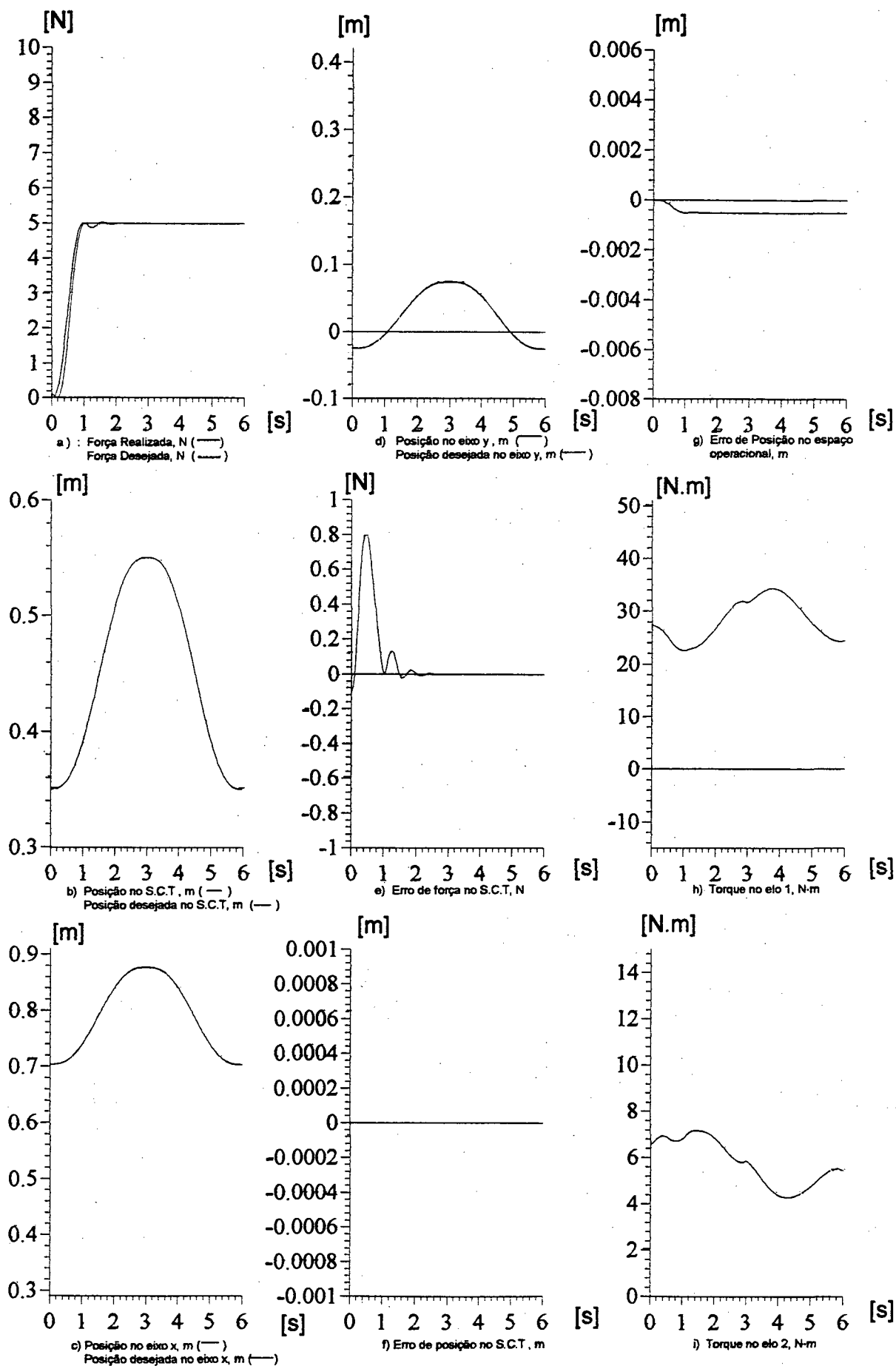


FIGURA 6.36 - CONTROLADOR: PARALELO
CASO 2 - PLANO INCLINADO
TAREFA:3

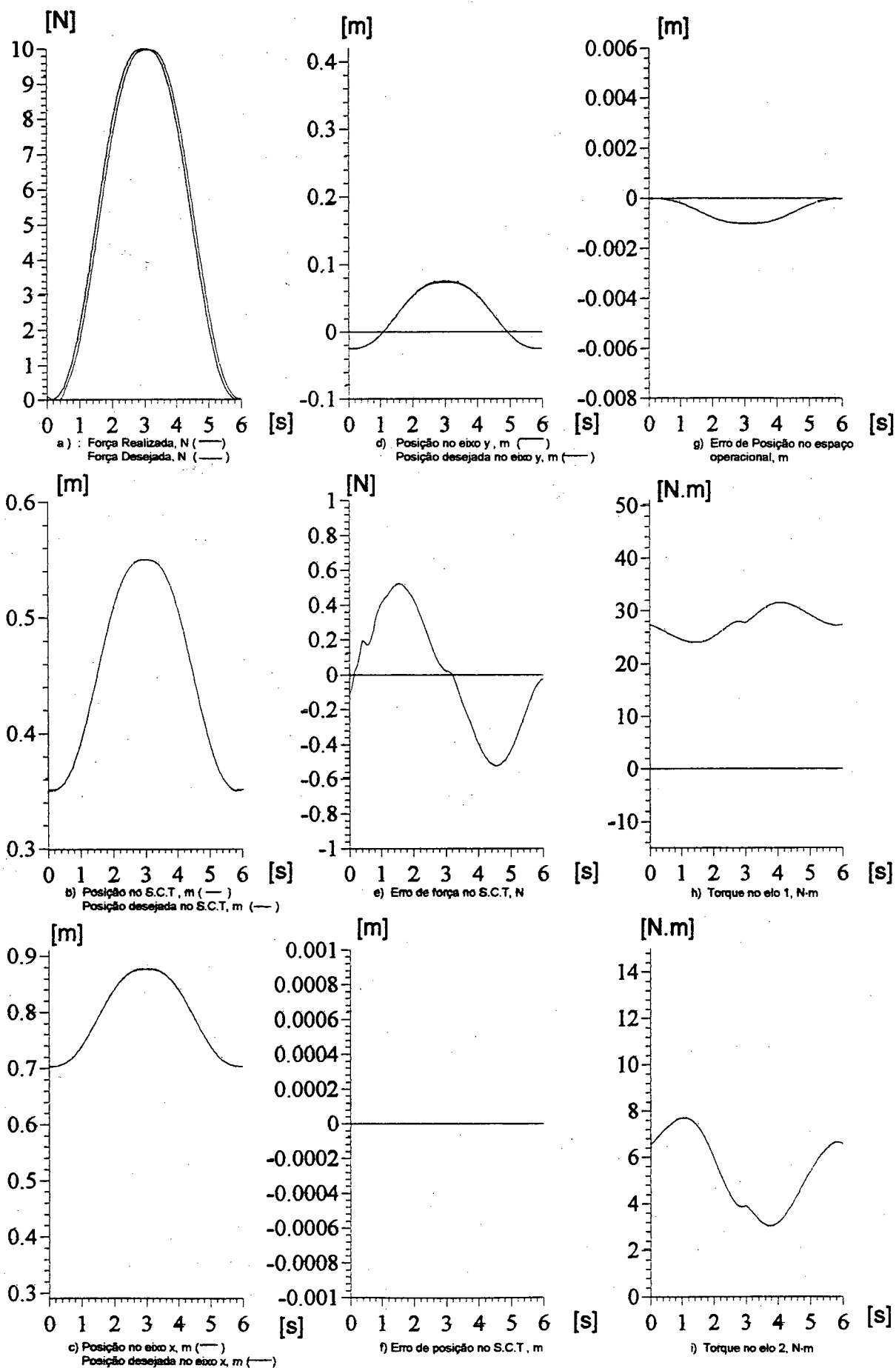


FIGURA 8.37 - CONTROLADOR: PARALELO
CASO 2 - PLANO INCLINADO
TAREFA:4

Para a curva os resultados são apresentados nas figuras 6.38 a 6.41, para as tarefas de 1 a 4 respectivamente. Novamente aqui, verifica-se que é necessário ajuste dos ganhos do controle de força já que quando existe um movimento de força, o erro de força torna-se maior. Observe ainda que o erro de força varia muito pouco em relação ao movimento do manipulador, pois estes são praticamente os mesmos para as mesmas situações de uso de força (figuras 6.38 e 6.40, e figuras 6.39 e 6.41)

Como o controlador utilizado para a força é do tipo PI não existe a possibilidade de se aumentar o amortecimento do sistema. Em todos os experimentos realizados com o controle paralelo experimentou-se valores maiores que a força desejada, ainda que pequenos.

Os torques de controle, modificam-se de forma suave, e não apresentam em nenhum momento, valores acima dos torques de saturação dos motores.

6.1.5 Gerais

A escolha do método de controle a ser empregado deve ser analisado com base nas incertezas da tarefa. Os métodos de controle no espaço operacional e o controle híbrido são métodos que se adaptam melhor a tarefas onde o meio pode ser perfeitamente definido, enquanto que o paralelo é melhor nas situações onde a posição do meio não está perfeitamente definido mas, a sua orientação deve ser perfeitamente conhecida.

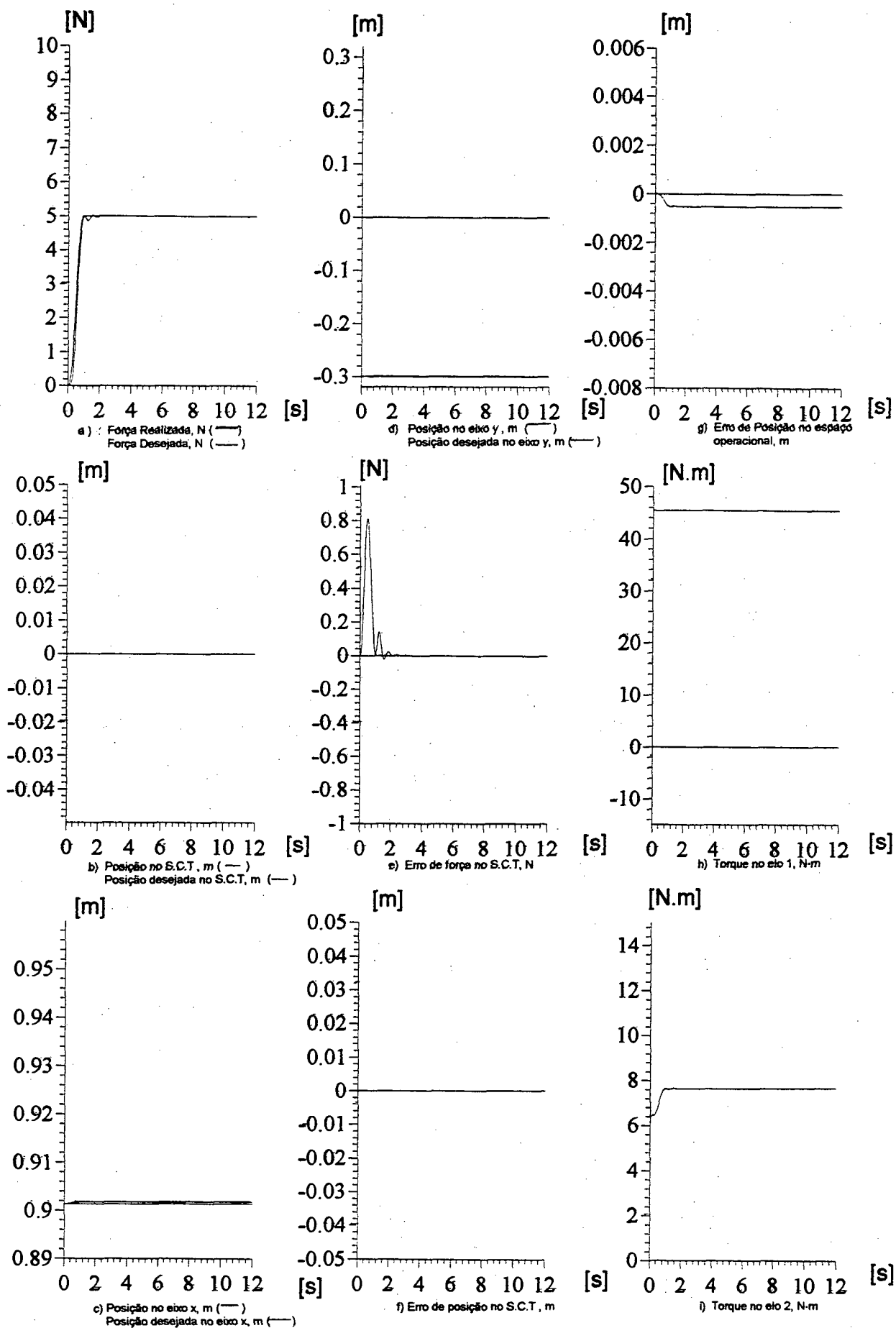


FIGURA 6.38 - CONTROLADOR: PARALELO
CASO 3 - SUPERFÍCIE CURVA
TAREFA:1

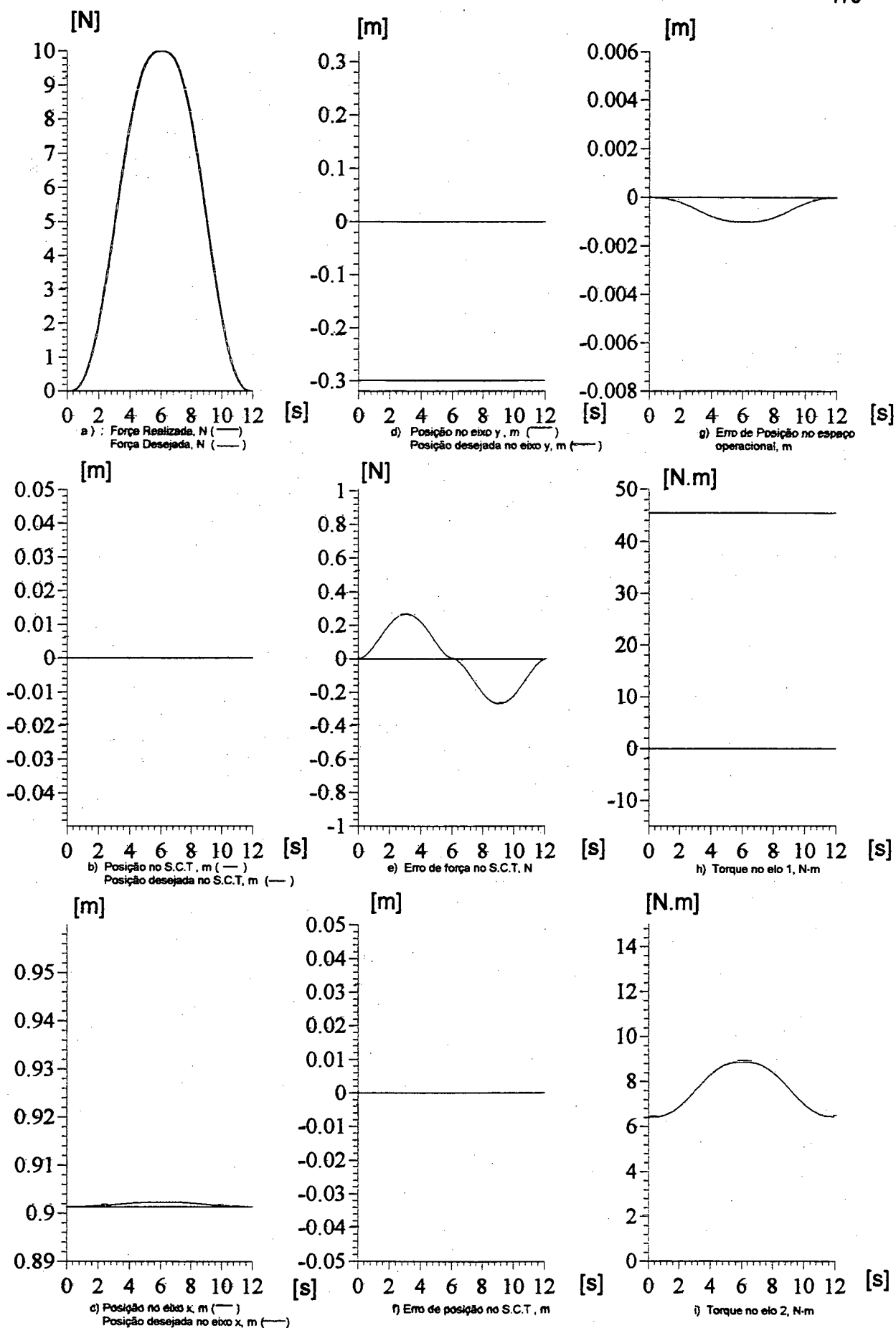


FIGURA 6.39 - CONTROLADOR: PARALELO
CASO 3 - SUPERFÍCIE CURVA
TAREFA:2

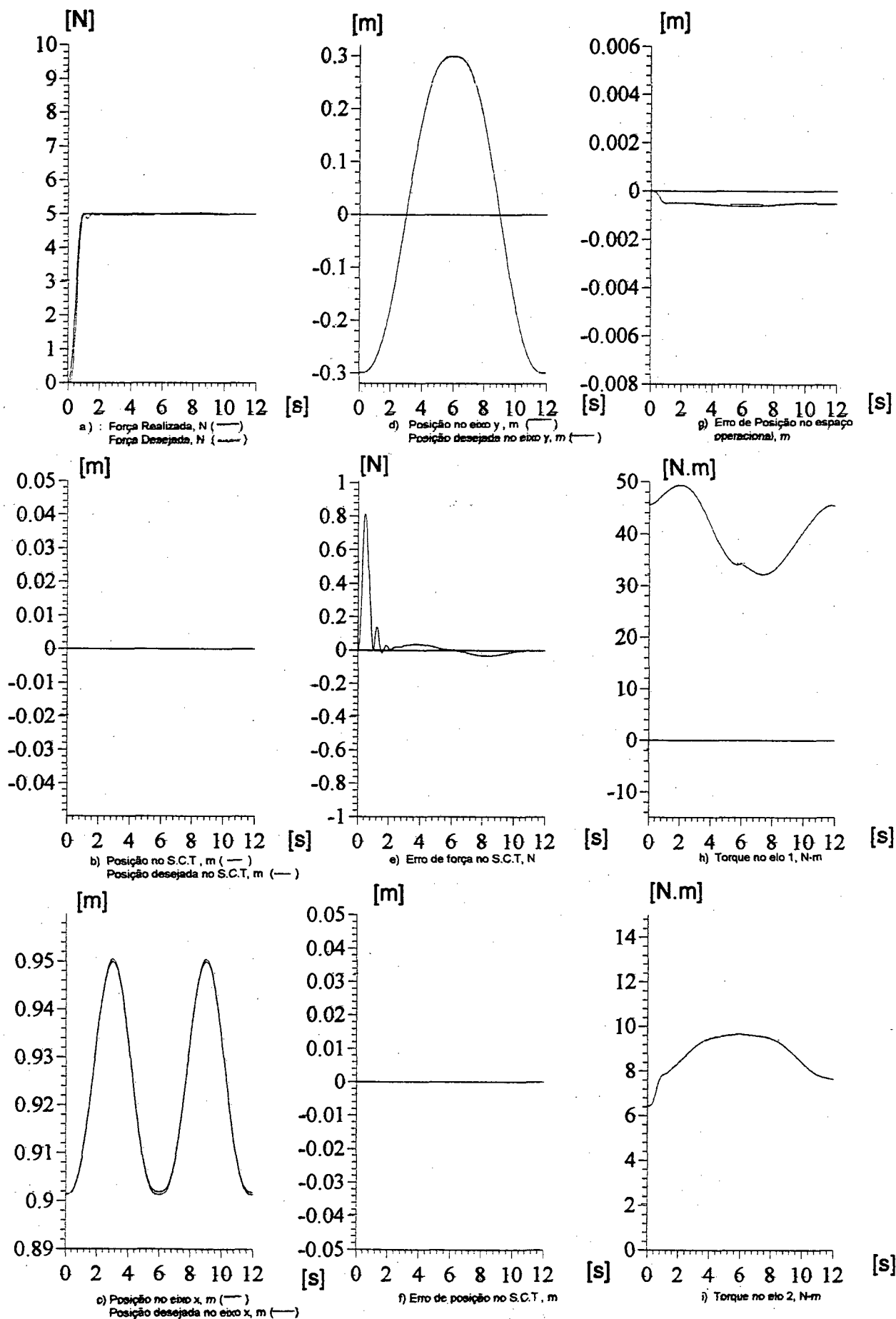


FIGURA 6.40 - CONTROLADOR: PARALELO
CASO 3 - SUPERFÍCIE CURVA
TAREFA:3

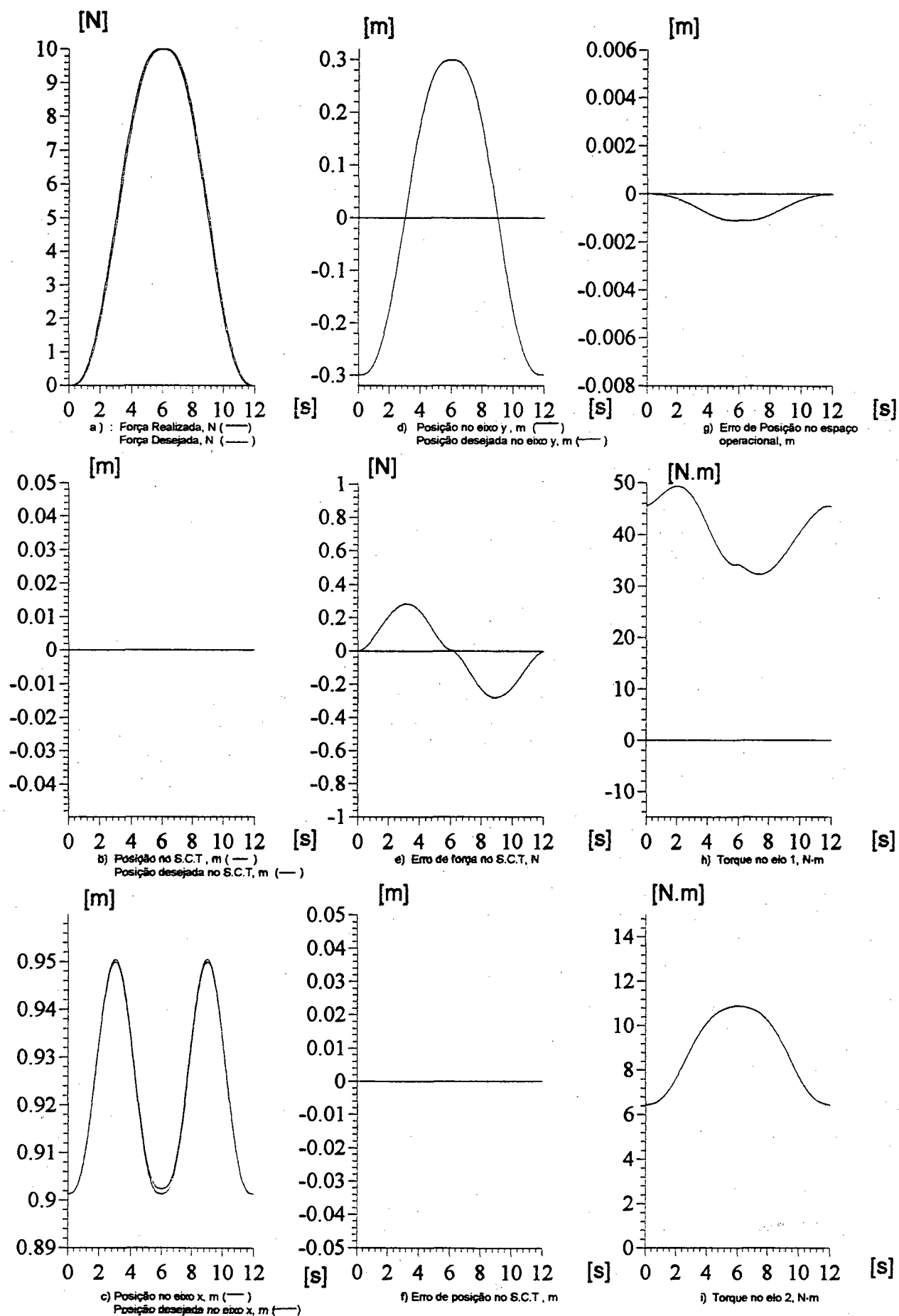


FIGURA 6.41 - CONTROLADOR: PARALELO
CASO 3 - SUPERFÍCIE CURVA
TAREFA: 4

O controle híbrido de força e posição e o controle no espaço operacional, obtiveram respostas iguais para uma mesma tarefa, portanto são equivalentes quando o meio está perfeitamente definido, podendo então o projetista optar pelo método que melhor lhe convier.

Existe uma diferença em valores absolutos, entre o erro de posição no sistema de coordenadas da tarefa e o erro de posição no espaço operacional. O erro de posição no sistema de coordenadas da tarefa é representado pela projeção do vetor de erro de posição no espaço operacional na direção onde é feito o controle de posição. Veja pela Figura 6.42 que para duas posições distintas, o erro de posição no sistema de coordenadas da tarefa (vetor AB) é o mesmo, enquanto que para o espaço operacional (vetor AC) ele é diferente.

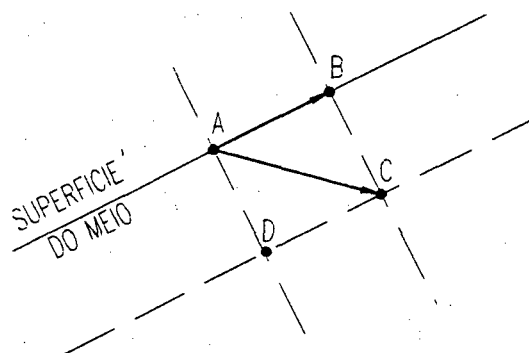


Figura 6.42 - Erros no sistema de coordenadas da tarefa e no espaço operacional

Seja A o ponto desejado para o posicionamento do manipulador na superfície do meio. Suponha que deseja-se efetuar além do posicionamento, uma força sobre o meio, então o ponto D corresponde ao ponto no qual a força desejada é alcançada.

Para análise da diferença entre os erros, suponha que a posição final do efetuador final do manipulador, por qualquer motivo, esteja sobre o ponto C e não sobre o ponto desejada A . O erro no espaço operacional para a posição é então dado pelo vetor AC , uma vez que a posição no espaço operacional é definida pelos vetores X e Y . O erro no sistema de coordenadas da tarefa, é dado pelo vetor AB , já que a posição no espaço operacional é dado somente através do vetor V . Portanto note que para o ponto A ou para o ponto D , no sistema de coordenadas da tarefa, o erro é nulo, o que não acontece no sistema de coordenadas operacional, onde somente no ponto A o erro é nulo.

6.2 ANÁLISE DA INCERTEZA DOS PARÂMETROS INERCIAIS DO MANIPULADOR NO DESEMPENHO DO CONTROLADOR

A incerteza nos parâmetros inerciais do manipulador é um fator que deve ser considerado quando se escolhe o tipo de controle de força e posição utilizado no manipulador. A análise da influência da variação destes parâmetros nas leis de controle será realizada para o manipulador realizando a tarefa 3 no plano inclinado. As simulações serão realizadas utilizando os ganhos relacionados aos controladores para as tarefa acima e com as incertezas nos parâmetros inerciais variando entre -70% e +100%.

6.2.1 Resultados Obtidos

6.2.1.1 Controle de Rigidez

No controle de rigidez nota-se que as incertezas inerciais afetaram o controlador nos erros de força e posição. Para valores dos parâmetros de inércia do manipulador menores que os utilizados no controlador, a força obtida é menor que a desejada até um limite de 5%, onde o manipulador apresenta um comportamento instável. Já para valores maiores que a inércia real do manipulador, a força exercida aumenta proporcional a incerteza na inércia. O manipulador também apresenta erro na posição desejada, que depende da variação dos parâmetros de inércia.

6.2.1.2 Controle de Híbrido de Força e Posição

No controle híbrido de força e posição, nota-se que as incertezas inerciais afetaram muito o controlador nos erros de força e posição. Para valores dos parâmetros de inércia do manipulador menores que os utilizados no controlador, o manipulador apresenta um comportamento instável. Nota-se ainda que pequenas variações na inércia do manipulador levam a um erro de força grande, a tal ponto que para valores de incertezas maiores que -1% o manipulador já apresenta um comportamento instável. Para valores de inércia maiores, a força exercida no meio é maior que a desejada. O manipulador também apresenta erro na posição desejada, que depende da variação dos parâmetros de inércia. A estabilidade é

portanto fortemente influenciada pela incerteza nos parâmetros de inércia do manipulador.

6.2.1.3 Controle no Espaço Operacional

O controle no espaço operacional apresenta as mesmas características do controle híbrido de força e posição.

6.2.1.4 Controle Paralelo

No controle paralelo nota-se que as incertezas inerciais afetam o controlador nos erros de força e posição. Para valores dos parâmetros de inércia do manipulador diferentes dos utilizados no controlador, a força obtida varia em torno da força desejada, e portanto, o erro de força apresentado é o menor entre os controladores analisados. O manipulador também apresenta erro na posição desejada, que depende da variação dos parâmetros de inércia. A estabilidade do manipulador é mantida durante a realização da tarefa para valores de incerteza na faixa de -5% a +5%, para valores fora deste intervalo, o manipulador pode apresentar intervalos de tempo onde o manipulador perde o contato com o meio e desloca-se livre pelo espaço, se no entanto ele retornar a encontrar o meio, certamente estará em um local diferente do previamente estabelecido, onde exercerá a força desejada.

6.3 ANÁLISE DE UMA MUDANÇA NAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO MEIO NO DESEMPENHO DO CONTROLADOR

Para realizar a análise do desempenho dos controladores quando ocorrem erros na definição da geometria da tarefa, foram realizadas duas simulações nas quais o ângulo de inclinação da tarefa 1 realizada no plano inclinado está com uma diferença de $\pm 1^\circ$ em relação ao informado para o controlador ($\varphi = -60^\circ$). A análise da influência deste erro nas leis de controle será realizada utilizando os ganhos relacionados aos controladores para as tarefa acima

6.3.1 Resultados Obtidos

6.3.1.1 Controle de Rigidez

No controle de rigidez nota-se que as incertezas na posição do meio afetaram o controlador. Quando o plano inclinado possui uma inclinação $\varphi = -59^\circ$, exerce uma força no meio maior que a desejada. Também observa-se um erro no posicionamento do manipulador. Quando o plano inclinado possui uma inclinação $\varphi = -61^\circ$, o manipulador deslocou-se pelo espaço livre, não exercendo força no plano inclinado, e o erro de posição para o controlador é nulo.

Os torques nos motores em ambos os casos estão abaixo dos torque de saturação dos motores. O manipulador apresenta um comportamento estável durante a realização das duas tarefas.

6.3.1.2 Controle de Híbrido de Força e Posição

No controle híbrido de força e posição nota-se que as incertezas na posição do meio afetaram o controlador nos erros de força e posição. Quando o plano inclinado possui uma inclinação $\varphi = -59^\circ$, o erro de força durante a realização da tarefa alto no início da tarefa, e vai diminuindo até estabilizar e um erro constante, onde a força aplicada é maior que a desejada. Também observa-se um pequeno erro no posicionamento do manipulador. Quando o plano inclinado possui uma inclinação $\varphi = -61^\circ$, a força exercida pelo manipulador é nula no início da tarefa, já que o manipulador não está em contato com o plano, quando ocorre o contato com o plano, ocorre um rápido aumento na força de contato que vai diminuindo até que se estabiliza num valor menor que a desejada. O surgimento deste erro de forças em ambos os casos é uma compensação imperfeita que ocorre no controlador, já que o Jacobiano é calculado com base em $\varphi = -60^\circ$.

Os torques nos motores não apresentam valores de torque acima dos torque de saturação dos motores, entretanto existe um pico no decorrer da tarefa, originado pelo contato do manipulador com o meio.

6.3.1.3 Controle Operacional

No controle no espaço operacional nota-se que as incertezas na posição do meio afetaram o controlador no erro de posição. Quando o plano inclinado possui uma inclinação $\varphi = -59^\circ$, o erro de força durante a realização da tarefa no início alto diminui de forma a oscilar e torno da força desejada. Também observa-se um erro no posicionamento do manipulador. Quando o plano inclinado possui uma inclinação $\varphi = -61^\circ$, observa-se um comportamento semelhante ao anterior, logo após o manipulador entrar em contato com o meio. Note que o comportamento do controlador no espaço operacional é diferente agora do controlador híbrido de força e posição, devido as diferenças no cálculo dos Jacobiano.

Os torques nos motores não apresentam valores de torque acima dos torque de saturação dos motores, entretanto existe um pico no decorrer da tarefa, originado pelo contato do manipulador com o meio.

6.3.1.4 Controle Paralelo

No controle paralelo nota-se que as incertezas na posição do meio afetaram o controlador no erro de posição. Quando o plano inclinado possui uma inclinação $\varphi = -59^\circ$, o erro de força durante a realização da tarefa vai diminuindo até que tornar-se nulo. Também observa-se um grande e crescente erro no posicionamento do manipulador, isto é originado pelo predomínio do controle de

força sobre o de posição. Quando o plano inclinado possui uma inclinação $\phi = -61^\circ$, o erro de força vai diminuindo até tornar-se nulo. Entretanto é presenciado um erro de posição crescente com o tempo, como no caso em que $\phi = -59^\circ$. Observe que a presença deste erro crescente de posição tornam o manipulador instável após um determinado período de tempo.

Os torques nos motores não apresentam valores de torque acima dos torque de saturação dos motores.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se uma sistematização dos fatores de interesse no projeto de um controlador de força para robôs manipuladores, enfatizando-se as necessidades e características relativas a cada controlador e também, fez-se uma comparação entre os métodos de controles aqui apresentados, para tarefas com características diferentes.

Quando o manipulador exerce tarefas onde não existe restrição ao seu movimento em qualquer direção, ou seja, não existem restrições naturais de força e/ou de posição, apenas um controle de posição é suficiente para a realização da tarefa. Entretanto, em outras tarefas, nas quais as restrições naturais de força e/ou de posição existem, torna-se necessário particionar o espaço de trabalho do manipulador em dois subespaços, um para o controle de força e outro para o controle de posição. Uma maneira lógica de fazer esta divisão é obtida utilizando-se o sistema de coordenadas da tarefa, que consiste em dividir o espaço da tarefa em dois subespaços. O subespaço onde é feito o controle de força é definido na direção normal à superfície da tarefa, enquanto que o subespaço relativo ao controle de posição é definido tangente a esta superfície. Entretanto, a definição da tarefa que o manipulador deverá executar é comumente dada no espaço gerado

pelo sistema de coordenadas da base do manipulador, ao qual chamamos de espaço operacional.

A opção de realizar o controle do manipulador no espaço operacional ou no sistema de coordenadas da tarefa cabe ao projetista, que deve optar, pelo método de controle mais adequado a realização de cada tarefa. Entende-se como método mais adequado ao controle do manipulador, aquele seja de mais fácil projeto e implementação e, ainda assim, atenda a todas as características necessária a realização da tarefa. Escolhido o método que melhor se adapta a determinada tarefa, é necessário descrever o modelo dinâmico do manipulador, sensor e meio no espaço na qual o controlador será implementado.

Os métodos de controle de força estão divididos em controle direto de força e controle indireto de força. No controle indireto de força temos o controle de rigidez, que é um método de controle de simples implementação, definido no sistema operacional, e que onde não utiliza sensores de força para medir a força de interação com o meio. A força de interação com o meio é estimada a partir do valor da rigidez do meio, uma vez que o manipulador é comandado para uma posição “dentro” do meio. Conhecendo-se a rigidez do meio é possível estimar a força de interação. Entretanto, este controlador possui como característica um erro de regime permanente que é função do ganho proporcional do controlador, tornando desta maneira o manipulador mais ou menos rígido, dependendo do valor do ganho adotado, razão pela qual é conhecido como controle de rigidez.

Nos métodos de controle direto, encontram-se o controle híbrido de força e posição, o controle no espaço operacional e o controle paralelo. Tanto o controle híbrido de força e posição quanto o controle paralelo possuem como características

o uso de matrizes de seleção, que são usadas no intuito de fazer a seleção das direções que terão o controle de força e de posição. Em ambos os controladores o comportamento desejado para o sistema pode ser conseguido através da definição dos ganhos e do tipo de controle a ser adotado para a força e para a posição, uma vez que, o controle é feito com uma completa linearização e desacoplamento do sistema. A diferença entre estes métodos de controle é que o controle híbrido de força e posição, descrito no sistema de coordenadas da tarefa, necessita dos valores desejados e do Jacobiano neste espaço, o que requer o uso de transformações do sistema de coordenadas operacional para o sistema de coordenadas do sistema de coordenadas da tarefa. Já o controle no espaço operacional, definido no espaço operacional, necessita o Jacobiano e os valores desejados diretamente neste espaço, o que evita transformações e cálculos adicionais na implementação do controlador. Ambos os controladores acima, não utilizam as informações dos sensores de força, quando o manipulador encontra um obstáculo não planejado.

O controle paralelo, diferencia-se dos dois métodos anteriores por não adotar matrizes de seleção. O mecanismo usado por este controlador para o seguimento simultâneo de força e posição é gerenciar os conflitos entre força e posição através de uma estratégia de controle que prioriza o controle de força (PI), sobre o de posição (PD). Neste controlador, implementado no espaço operacional, o desempenho do controlador é dado por uma dinâmica de terceira ordem, resultando num sistema mais lento que os anteriores. A principal desvantagem na utilização deste controlador é que erros na direção da força desejada, implicam num desvio contínuo da posição do manipulador, podendo levar o manipulador a instabilidade.

A implementação e a análise do comportamento de cada controlador visto acima, foi feita através de simulações nas quais um manipulador, com dois graus de liberdade, realizou tarefas distintas envolvendo o controle de força e posição, em três meios com características geométricas diferentes. O modelo dinâmico do manipulador foi obtido a partir de dados do robô manipulador PUMA 560. Neste modelo considerou-se o manipulador como rígido, desprezou-se a dinâmica elétrica dos motores. A fim de obter-se um manipulador com dois graus de liberdade, apenas o 2° e o 3° elo do PUMA 560 possuíram movimento, sendo que os demais elos permaneceram travados durante a realização das tarefas. As tarefas, nas quais o manipulador deve seguir trajetórias de força e posição, foram realizadas em um plano vertical, em um plano inclinado e em uma superfície curva. Nestes três casos, o meio possui uma rigidez conhecida e a superfície onde ocorre o contato com o manipulador está livre de atritos. Em seguida, foram realizadas simulações com os ganhos projetados para os controladores acima, para existir um erro na avaliação da inércia do manipulador e para um erro de planejamento da tarefa.

Para o controle de rigidez, foi presenciado que o erro de regime é função do ganho do controlador e que, quando o manipulador está em movimento este erro pode aumentar ou diminuir, dependendo das características do movimento, uma vez que a lei de controle não prevê a compensação dos termos relativos aos torques inerciais e nem dos torques centrífugos e de Coriolis. Quanto a erros na avaliação da inércia do manipulador, este controlador mostrou-se estável para uma grande faixa de incerteza, porém a um custo elevado, já que a força aplicada varia muito em função destas incertezas. E finalmente para o erro no planejamento da tarefa,

observou-se resultados extremos com o manipulador deslocando-se livre pelo espaço ou então aplicando uma força muito elevada.

Os controladores híbrido de força e posição e o operacional, apresentaram resultados iguais para as diversas tarefas, mostrando que são equivalentes. Nestes controladores, verificou-se a existência de erros pequenos ou nulos para os valores desejados de força e posição. Estes controladores mostraram-se pouco robustos quanto a variação dos valores inerciais do manipulador, uma vez que erros próximos a 1% do valor real da inércia, já levaram os controladores a instabilidade. Para o erro de planejamento da tarefa, contudo, estes controladores levaram o manipulador a exercer força diferente da desejada num ponto não desejado.

O controle paralelo obteve também, pequenos erros de força e de posição, entretanto o tempo necessário para atingir-se o erro nulo para a força é maior que nos anteriores. Este controlador quando em operação com erros na avaliação da inércia do manipulador obteve um comportamento satisfatório, pois manteve-se estável dentro da faixa de variação imposta e realizou a tarefa de forma adequada, entretanto seu comportamento quando erros na especificação da tarefa foram verificados, mostrou-se insatisfatório, uma vez que o manipulador manteve um desvio constante da posição do efetuador final.

O resultados das simulações aqui mostradas, podem ser diferentes quando os mesmos parâmetros forem utilizados na prática, pois o modelo do manipulador aqui utilizado é rígido, enquanto na realidade, o manipulador é flexível, o que abre caminho para estudos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

An, C. H.; Atkeson; C. G. Hollerbach; J. M. . **Model-Based Control of a Robot Manipulator**, 1988.

Armstrong, Brain; Kathib, Oussama; Burdick, Joel. **The Explicit Dynamic Model and Inertial Parameters of Puma 560 Arm**. IEEE , v.2, p. 510-518, 1986.

Asada H.; Slotine J.J. . **Robot Analysis and Control**, Massachusetts Institute of Technology, John Wiley and Sons Inc., 1986.

Chae, H. An; Hollerbach, John. **Dynamic Stability Issues in Force Control of Manipulators**. IEEE , v.3, p. 890-896, 1987.

Chae, H. An; Hollerbach, John. **Kinematic Stability Issues in Force Control of Manipulators**. IEEE , v.3, p. 897-903, 1987.

Chiaverini, Stefano; Siciliano, Lorenzo. **The Parallel approach to Force Position Control of Robotics Manipulators**. IEEE Transaction on Robotics and Automation, v. 9, n. 4, p. 361-373, ago. 1993.

Craig, J. J. .**Introduction to Robotics - Mechanics and Control**, Addison-Wesley Publishing Co., 1986.

De Wit; C. Canudas; Brogliato, B.; De Lucca, et al. . **Theory of Robot Control**, Ecole D'ETE D'Automatique de Grenoble, Grenoble, The European Summer School of Laboratory of Automatic Control of Grenoble, França, 1992.

Eppinger, Steven D.; Seering, Warren P. . **Three Dynamic Problems in Robot Force Control**. IEEE Transaction on Robotics and Automation, v. 8, n. 6, p.751-758, dez. 1992.

Eppinger, Steven D.; Seering, Warren P.. **Introduction to Dynamic Models for Robot Force Control**. IEEE Control Systems, p.48-52, abr. 1987.

Eppinger, Steven D.; Seering, Warren P.. **Understanding Bandwidth Limitations in Robot Force Control**. IEEE Int. Conf. Robotics Automat., p. 904-909, abr. 1987.

Ferretti G.; Magnani G.; Rocco, P. .**On the Stability of the Integral Force Control in Case of Contact with Stiff Surfaces**. Transactions of the ASME - Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 117: 547-553, Dez. 1995.

Franklin, F. Gene; Powell, J; Abbas Emani-Naeini. . **Feedback Control of Dynamic Systems**. Addison-Wesley Publishing Co., 1986.

Guenther, R.. **Projeto de um controlador adaptativo para robôs manipuladores**, Anales VI Congresso Nacional de Ingenieria Mecanica, Santiago, Chile, p. 149-154, nov. 1994.

Khatib, Oussama. . **A Unified Approach for Motion and Force Control of Robots Manipulators: The Operational Space Formulation**. IEEE Journal Robot Automation, v. RA3, n.1, p. 43-53, fev. 87.

Klafter, R. D.; Chmielewski, T. A.; Negin, M. . **Robotic Engineering - An Integrated Approach**, Prentice-Hall International Edition, 1989.

Lewis, F. L; Abdallah, C. T; Dawson, D. M. . **Control of Robot Manipulators**, MacMillan, Publishing Co., 1993.

Mason, T. M. . **Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators**, IEEE Transactions on Systems, Man. and Cybernetics SMC-11, p. 418-432, jun. 1981.

Murray, R.; Li, Z.; Sastry, S. S. . **A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation**, CRC Press Inc, 1994.

Raibert, M. H.; Craig J. J. . **Hybrid Position/Force Control of Manipulators**. Transactions of the ASME - Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 102: 126-133, jun. 1981.

Spong, M. W.; Vidyasagar, M. . **Robot Dynamics and Control**, John Wiley and Sons, 1989.

Stefano Chiaverini; Bruno Siciliano; Luigi Villani. . **Force Position Regulation of Compliant Robot Manipulators**. IEEE Transaction on Automatic Control, v. 39, n. 3, p. 647-652, mar. 1994.

Volpe, Richard Allan. **Real and Artificial Forces in Control of Manipulators: Theory and Experiments**, Doctor Thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburg, U.S.A., 1990.